



André da Costa Francisco

Licenciado em Engenharia Civil

Modelação numérica de vias-férreas com palmilhas de travessa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor José Nuno Varandas Ferreira,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana, FCT/UNL
Arguente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová, FCT/UNL
Vogal: Professor Doutor José Nuno Varandas Ferreira, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2016

Modelação numérica de vias-férreas com palmilhas de travessa

“Copyright” André da Costa Francisco, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta dissertação simboliza a conclusão de mais um ciclo do meu percurso académico. A sua realização não teria sido possível sem a colaboração de algumas pessoas às quais gostaria de agradecer.

Em primeiro lugar, agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que me confere o grau de mestre, bem como a todos os seus colaboradores, pela partilha de conhecimentos e profissionalismo demonstrado.

Agradeço ao meu orientador Doutor José Nuno Varandas da Silva Ferreira. Por ter aceite o tema, pela inclusão no programa "Pegasus" de algumas funcionalidades cruciais ao desenvolvimento desta dissertação, e acima de tudo pelo interesse demonstrado em todas as discussões de ideias que promoveram a realização deste documento.

Agradeço à Doutora Simona Fontul por todos os conhecimentos partilhados sobre infraestruturas ferroviárias. Gostaria de reconhecer o seu profissionalismo e excelência na exposição destas temáticas, e a acima de tudo a sua capacidade de despertar o gosto pela engenharia ferroviária.

Também agradeço ao Mestre Hamidreza Heydari-Noghabi pela cedência dos dados do trabalho experimental executado na linha Mashhad-Tehran, que permitiram testar os modelos numéricos desenvolvidos nesta dissertação.

Por último, contudo com o papel mais importante, gostaria de agradecer a minha família. Aos meus filhos Rafael e Isabel por estar menos disponível para eles, em virtude da realização deste trabalho. À minha esposa Maria Eduarda, pelo esforço acrescido a cuidar dos nossos filhos no final deste ciclo de estudos. À minha sogra Maria da Conceição pelo apoio incansável prestado à filha e aos netos na minha ausência.

Resumo

O ruído e as vibrações transmitidas pelo meio de transporte ferroviário têm sido alvo de estudos devido à sua interação com o meio envolvente. Por outro lado, as condições de suporte da via variam ao longo da sua direção longitudinal, afetando a rigidez vertical da mesma. O ruído, as vibrações e a rigidez da via estão intrinsecamente acoplados e destes depende a viabilidade da via férrea. A presente dissertação aborda algumas questões relacionadas com a importância do transporte ferroviário na atual conjuntura. Analisa os principais componentes da via ferroviária balastrada e introduz a temática da utilização de palmilhas de travessa para mitigar os problemas atrás citados, além de apresentar um estudo sobre a sua utilização. Posteriormente, é realizado um estudo sobre um ensaio experimental realizado no Irão, numa via com palmilhas de travessa instaladas, e o mesmo é reproduzido num modelo tridimensional de elementos finitos. É feito um estudo paramétrico para perceber a influência da introdução de elementos resilientes nos deslocamentos ferroviários. Este estudo visa contribuir para um maior entendimento da influência das palmilhas de travessa no comportamento da via e fornecer um ponto de partida para o pré-dimensionamento destes elementos. Por fim, são analisados através de modelos numéricos dois estudos de caso: uma via que apresenta uma variação brusca da rigidez da fundação e uma via com desgaste ondulatório. Nestes estudos é analisada a resposta do sistema veículo-via com e sem a introdução de palmilhas de travessa.

Palavras chave: via ferroviária balastrada; elementos resilientes; palmilhas de travessa; modelação numérica; deslocamento vertical do carril.

Abstract

The noise and vibrations transmitted by railway transport have been investigated because of their environmental impact. On the other hand, the railway support conditions vary along its longitudinal direction, affecting the vertical stiffness. The noise, vibration and the track stiffness are closely coupled and the viability of the railway depends on them. This dissertation includes a reflexion about the importance of the rail transport in the current days. The main components of ballasted railways are presented in this document, and it is discussed the application of the under sleeper pads to mitigate the aforementioned problems, and feedback about its use is provided. Afterwards an experimental study is analysed and reproduced with a three dimensional finite element model. This experimental study was carried out in Iran on a railway with under sleeper pads installed. A parametric study was elaborated to understand the influence of the introduction of resilient elements on the rail displacements. This study aims to contribute to a greater understanding of the influence of the under sleeper pads in the railway behavior and provide a starting point for the pre-dimensioning of these elements. Finally, two study cases are analysed with numeric models: a railway track with sudden variation of the stiffness foundation and a railroad with corrugation in the rail. In these studies, the response of the vehicle-track system is analysed with and without the introduction of the under sleeper pads.

Key words: ballast railway track; resilient elements; under sleeper pads; numerical modeling; vertical displacements of the rail

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Lista de símbolos e abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos Gerais	3
1.4 Estrutura do trabalho	4
2 Via férrea descrição genérica e problemáticas	5
2.1 Via férrea generalidades	5
2.2 Elementos constituintes da via balastrada	6
2.2.1 Carril	6

2.2.2	Palmilhas de carril (RP)	7
2.2.3	Fixações	8
2.2.4	Travessas	8
2.2.5	Palmilhas de travessa (USP)	9
2.2.6	Balastro	13
2.2.7	Sub-balastro	13
2.2.8	Coroamento	14
2.2.9	Fundação da via	14
3	Modelação da via	17
3.1	Pegasus - programa de cálculo 3D	17
3.2	Pegasus - princípios matemáticos subjacentes	18
3.3	Pegasus interação travessa-balastro	20
3.4	Pegasus modelos de veículo	21
4	Modelação de ensaios experimentais	23
4.1	Introdução	23
4.2	Instrumentação da via	24
4.3	Análise dos dados experimentais	24
4.4	Modelos numéricos	27
4.5	Validação dos modelos numéricos	32
4.6	Análise dos modelos numéricos	34
5	Estudo paramétrico	41
5.1	Introdução	41
5.2	Otimização do modelo	43
5.3	Dados que definem o modelo	46
5.3.1	Constantes do estudo paramétrico	46
5.3.2	Variáveis do estudo paramétrico	47

5.4	Apresentação dos resultados do estudo paramétrico	49
6	Análise de modelos com cargas dinâmicas	53
6.1	Introdução	53
6.2	Estudo da variação brusca de rigidez da via	54
6.2.1	Descrição do modelo	54
6.2.2	Resultados da variação brusca de rigidez da via	55
6.3	Estudo de um troço de via com desgaste ondulatório	61
6.3.1	Descrição do estudo de caso	62
6.3.2	Descrição do modelo	64
6.3.3	Resultados numéricos da via com desgaste ondulatório	67
7	Conclusões e desenvolvimentos futuros	73
7.1	Conclusões	73
7.2	Desenvolvimentos futuros	75
	Bibliografia	77
A	Estudo Paramétrico - apresentação de resultados	81
A.1	Introdução	81
A.2	Equação aproximada do deslocamento do carril	84
A.3	Representação 2D do deslocamento do carril	85

Índice de Figuras

1.1	Emissões de CO ₂	2
2.1	Esquema de uma via balastrada com palmilhas de travessa	6
2.2	Fixação tipo Vossloh	8
2.3	Instalação de palmilhas de travessa	9
2.4	Esquema de deformação de um bloco de elastômero	10
3.1	Modelo 3D do Pegasus	18
3.2	Etapas de cálculo do Pegasus	18
3.3	Esquema do modelo de elementos finitos da super-estrutura	19
3.4	Esquema da direção transversal da travessa	21
3.5	Modelos de veículos de massas não suspensas	22
3.6	Modelos de veículos com massas suspensas e não suspensas	22
4.1	Esquema da instrumentação da via	23
4.2	Velocidade de vibração vertical, geofones 1, 2 e 3 (via com USP), geofones 4, 5 e 6 (via sem USP)	25
4.3	Resposta em frequência no eixo da via	26
4.4	Resposta em frequência a 3 m do eixo da via	26
4.5	Resposta em frequência a 7 m do eixo da via	27
4.6	Malhas de elementos finitos	28
4.7	Dimensões do modelo numérico	29

4.8	Esquema do material circulante	31
4.9	Nivelamento da via Mashhad-Tehran ($\lambda > 3,0$ m)	31
4.10	Irregularidades da via Mashhad-Tehran ($\lambda < 3,0$ m)	32
4.11	Deslocamento vertical do balastro no eixo longitudinal da via	33
4.12	Velocidade vertical do balastro no eixo longitudinal da via	34
4.13	Deslocamentos verticais máximos e mínimos do carril nos modelos numéricos	34
4.14	Comportamento da travessa em deslocamento e velocidade nos modelos numéricos	35
4.15	Comportamento da travessa em acelerações nos modelos numéricos	35
4.16	Deslocamentos do carril medidos antes da passagem do veículo que se encontra em movimento	36
4.17	Comportamento da travessa nos modelos numéricos após o processo de filtragem	37
4.18	Estado inicial das forças de contacto travessa-balastro nos modelos numéricos	38
4.19	Forças de contacto travessa-balastro induzidas pelo veículo nos modelos numéricos	39
4.20	Forças de interação roda-carril nos modelos numéricos	39
4.21	Análise em frequência das forças de interação roda-carril	40
4.22	Forças de interação roda-carril nos modelos numéricos após o processo de filtragem	40
5.1	Esquema tipo da via balastrada adotada no estudo paramétrico	42
5.2	Otimização da geometria do modelo	45
5.3	Diferença da otimização da geometria dos modelos	46
5.4	Dimensões do modelo otimizado para o estudo paramétrico	46
5.5	Sistema de rigidez equivalente	49
5.6	Deslocamento do carril em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação	50
5.7	Força transmitida ao balastro em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação	51

6.1	Modelo de veículo adotado nos ensaios dinâmicos	54
6.2	Dimensões do modelo com variação longitudinal da rigidez da fundação	55
6.3	Máximo deslocamento negativo do carril	58
6.4	Forças de interação roda-carril numa variação brusca da rigidez da fundação, considerando a utilização, ou não de USP	59
6.5	Forças de interação roda-carril numa variação brusca da rigidez da fundação, em zona homogênea e de transição	60
6.6	Forças de interação travessa-balastro numa variação brusca da rigidez da fundação, considerando a utilização, ou não, de USP . . .	61
6.7	Via de Cintura	63
6.8	Desgaste ondulatório do carril interno da Linha de Cintura	63
6.9	Dimensões do modelo numérico da via com desgaste ondulatório .	64
6.10	Nivelamento da linha de cintura introduzido no modelo numérico ($\lambda > 3.0$ m)	65
6.11	Irregularidades da linha de cintura introduzidas no modelo numérico ($\lambda < 3.0$ m)	66
6.12	Máximo deslocamento negativo no carril, numa via com desgaste ondulatório	67
6.13	Força roda-carril, num carril com desgaste ondulatório	67
6.14	Força roda-carril, num carril sem desgaste ondulatório	68
6.15	Força roda-carril utilizando palmilhas de carril suaves	68
6.16	Análise das forças de interação roda-carril em frequência	69
6.17	Máxima magnitude das forças de interação travessa-balastro numa via com desgaste ondulatório	70
6.18	Análise dos deslocamentos em diferentes nós do modelo de elementos finitos	71
A.1	Geometria tipo do modelo	82
A.2	Esquema tipo da via balastrada	82
A.3	Deslocamento do carril em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação . . .	84

A.4 Diferença no cálculo do deslocamento do carril com recuso à Equação(A.2)	85
A.5 Deslocamento do carril com USP1	86
A.6 Deslocamento do carril com USP2	86
A.7 Deslocamento do carril com USP3	86
A.8 Deslocamento do carril com USP4	87
A.9 Deslocamento do carril com USP5	87
A.10 Deslocamento do carril sem USP	87
A.11 Deslocamento do carril com RP1	88
A.12 Deslocamento do carril com RP2	88
A.13 Deslocamento do carril com RP3	88
A.14 Deslocamento do carril com RP4	89
A.15 Deslocamento do carril com RP5	89
A.16 Deslocamento do carril com RP6	89

Índice de Tabelas

2.1	Valor do coeficiente β_2	11
4.1	Parâmetros da linha férrea Mashhad-Tehran	24
4.2	Parâmetros da super-estrutura	29
4.3	Parâmetros de contacto entre a travessa e o balastro	30
4.4	Parâmetros da sub-estrutura	30
4.5	Parâmetros do material circulante	30
4.6	Tratamento estatístico das forças de contacto travessa-balastro induzidas pelo veículo	38
4.7	Tratamento estatístico das forças de interação roda-carril dos modelos numéricos	39
5.1	Otimização geométrica do modelo	44
5.2	Parâmetros da super-estrutura do estudo paramétrico	47
5.3	Parâmetros de contacto travessa-balastro constantes no estudo paramétrico	47
5.4	Parâmetros da sub-estrutura constantes no estudo paramétrico . . .	48
5.5	Parâmetros dos elementos resilientes	48
5.6	Módulos de elasticidade da fundação no estudo paramétrico	49
6.1	Parâmetros da super-estrutura	56
6.2	Disposição das USP nos modelos numéricos	56
6.3	Parâmetros de caracterização das USP adotadas nos modelos numéricos	56

6.4	Parâmetros da sub-estrutura	57
6.5	Parâmetros do Alfa Pendular	57
6.6	Pré-dimensionamento da combinação de USP, estimativa do deslocamento do carril	57
6.7	Comparação entre deslocamentos estimados pela Equação (A.2) e os obtidos nos modelos numéricos	58
6.8	Critérios de aceitação do desgaste ondulatório do carril	62
6.9	Parâmetros da super-estrutura	65
6.10	Parâmetros de contacto entre a travessa e o balastro	65
6.11	Parâmetros da sub-estrutura	66
A.1	Rigidez vertical das palmilhas de carril (RP) e de travessa (USP) . .	82
A.2	Módulos de elasticidade da fundação	82
A.3	Modelos analisados	83
A.4	Parâmetros da Equação (A.2)	84

Lista de símbolos e abreviaturas

Convenções

A Matriz

a Vetor

A, a Escalar

Subscrito

$\alpha_{a.b}$ Referente à interação travessa-balastro

$\alpha_{a.w}$ Referente à interação roda-carril

α_b Referente ao balastro

α_{crm} Referente ao coroamento da fundação

α_{cr} Referente ao carril

α_e Referente ao eixo do veículo

α_{fd} Referente à fundação

α_g Componente gravítica associada ao peso próprio

α_p Referente às palmilhas de carril

α_{sb} Referente ao sub-balastro

α_s Referente à sub-estrutura da via

α_{tr} Referente à travessa

α_t Referente à super-estrutura da via

α_{USP} Referente às palmilhas de travessa

α_v Referente ao veículo

Símbolos Latinos

C Matriz de amortecimento

K	Matriz de rigidez
M	Matriz de massa
a, \mathbf{a}	Aceleração
E	Módulo de Young
F, f	Força
G	Módulo de distorção
I	Momento de inércia
K	Rigidez
m	Massa
R	Raio
t	Tempo
u, \mathbf{u}	Deslocamento
v, \mathbf{v}	Velocidade
x	Posição na direção longitudinal da via
y	Posição na direção transversal da via
z	Posição na direção da profundidade da via

Símbolos Gregos

γ	Ângulo de distorção
λ	Comprimento de onda
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa volúmica

Abreviaturas

CO ₂	Dióxido de carbono
RP	Palmilhas de carril, do inglês Rail Pad
USP	Palmilhas de travessa, do inglês Under Sleepers Pads

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A adesão de Portugal à Comunidade Económica Europeia (CEE), foi um marco importante no desenvolvimento da sua rede de transportes, proporcionando a mobilização de investimentos no âmbito dos Quadros Comunitários de Apoio. Contudo estes investimentos materializaram-se essencialmente no desenvolvimento das infraestruturas rodoviárias (Sousa et al., 2009).

A Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP) e as suas antecessoras empresas gestoras das infraestruturas ferroviárias, foram forçadas a um esforço financeiro acrescido, ao qual contribuiu a crise económico-financeira, tornando imperativo o estudo de viabilidade dos troços da rede ferroviária e por conseguinte o encerramento de alguns.

O aquecimento global exigiu um esforço adicional no sentido de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2), sendo uma diretriz assumida pela Organização das Nações Unidas (ONU), através do Protocolo de Quioto. Portugal cumpriu este protocolo superando as expectativas no período 2008 a 2012 (Garçia, 2014).

O Protocolo de Quioto foi cumprido com uma margem confortável, considerando o efeito benéfico das florestas, como pode ser visto na Figura 1.1 (a). O setor com melhor desempenho na redução de emissões de CO_2 foi da produção elétrica, por outro lado, o setor dos transportes apresenta uma evolução menos positiva. Segundo (Garçia, 2014) o fraco desempenho do setor dos transportes deve-se ao elevado investimento na rodovia.

A Figura 1.1 (b), pretende salientar a eficiência ambiental do transporte ferroviário, onde se mostra a emissão média de CO_2 por 100 km de viagem e por tipo de transporte.

Neste sentido, o livro branco da União Europeia (UE) de 2011 destaca a

necessidade do aumento do transporte ferroviário e propõe para 2030 que mais de 30% do transporte de mercadorias com um trajeto superior a 300 km seja efetuado por via ferroviária ou marítima.

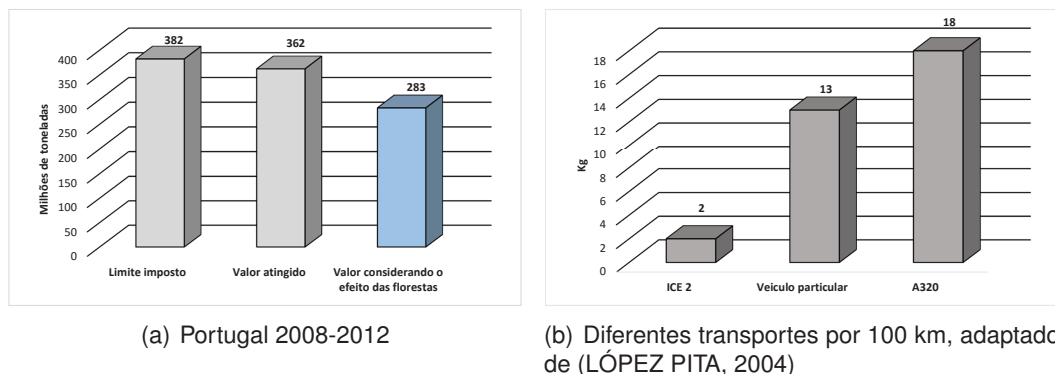


Figura 1.1: Emissões de CO₂

Apesar das inúmeras vantagens do transporte ferroviário, este não está isento de dificuldades técnicas, como por exemplo: o ruído, as vibrações e a manutenção da geometria da via. Uma das medidas possíveis para mitigar estas dificuldades consiste na introdução de elementos resilientes na estrutura da via, tais como, palmilhas de carril ou palmilhas de travessa (Sol-Sánchez et al., 2015; Lakušić et al., 2010; Auersch-Saworski, 2014; Gräbe et al., 2016).

Em Portugal foram instaladas palmilhas de travessa (USP) numa passagem superior na Linha do Sul. Esta zona foi devidamente instrumentada para aferir o efeito da sua introdução no comportamento dos restantes elementos da super-estrutura da via (Paixão, 2014). Também foram introduzidos estes elementos numa solução híbrida com manta de balastro, na Linha de Sintra, na passagem inferior dos Missionários. O objetivo da mesma foi reduzir o ruído ferroviário (Andrade, 2013).

1.2 Motivação

No decorrer da unidade curricular de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, foi salientado o significativo custo de manutenção de vias férreas, que inclui a correção da geometria da via e o controlo sobre o estado dos carris. A vibração provocada pela interação entre o material circulante e a via é uma das causas de degradação da via e da sua geometria, afetando tanto o próprio carril como o balastro sob as travessas.

Por outro lado, durante o percurso profissional do autor, foi possível observar um fenómeno interessante em estruturas metálicas que suportam equipamentos vibrantes: com o tempo surgem fissuras, que embora sejam reparadas e

reforçadas, tendem a reaparecer com maior gravidade.

Os dois casos acima referidos, aparentemente desacoplados têm algo em comum: os elevados custos associados e o facto das patologias serem provocadas pela transmissão de vibrações aos materiais. Nestas situações, tendencialmente, a sua resolução definitiva é complexa.

Também, após alguns anos a trabalhar na indústria de reciclagem de pneus em fim de vida, foi possível adquirir uma perceção da pegada ecológica portuguesa. Uma das possíveis medidas de mitigação do problema passa pela reintrodução do resíduo no mercado. Este processo pode ser feito através da transformação mais ou menos complexa, até tornar o resíduo num produto útil e rentável.

A ideia subjacente a esta dissertação consiste em estudar a aplicação de palmilhas de travessa em toda a extensão da via, mitigando grandemente a transmissão de vibrações ao balastro. Esta solução pode comportar custos significativos, porém se as palmilhas fossem fabricadas com uma carga de granulado de borracha (um subproduto da reciclagem de pneus), é expectável uma redução dos custos.

A metodologia idealizada consiste em aplicar um processo de fabricação idêntico à produção de pavimentos de *Tartan*, adaptado aos condicionalismos da ferrovia. Tal método pode contribuir para a valorização do resíduo e potenciar o desenvolvimento ou criação de uma Pequena ou Média Empresa (PME) interessada neste ramo de negócio.

1.3 Objetivos Gerais

Este documento visa contribuir para a otimização dos caminhos-de-ferro, em particular nas problemáticas associadas à transmissão de vibrações e homogeneização da rigidez vertical da via. Com o recurso à modelação numérica pretende-se: estudar o impacto das palmilhas de travessa nas vias férreas balastradas e estudar a viabilidade técnica da sua utilização, bem como a possibilidade de produzi-las em novos materiais como por exemplo, em poliuretano (PU) com adição de granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus.

O desenvolvimento de uma solução desta natureza tem potencial para aumentar a operacionalidade das vias férreas, reduzindo assim, os custos de manutenção com um investimento sustentável, sem interferir com os meios e procedimentos de manutenção implementados pelas empresas gestoras.

A metodologia a seguir consiste na seguinte abordagem: análise de ensaios experimentais "in situ" de vias com e sem palmilhas de travessa, calibração e validação modelos numéricos tridimensionais e análise dos mesmos.

Compreendendo a influência da combinação entre palmilhas de travessa e de

carril para diferentes tipos de solo, pretende-se desenvolver um método expedito de pré-dimensionamento desta combinação.

Após o desenvolvimento da metodologia de pré-dimensionamento, pretende-se desenvolver novos modelos numéricos para testar a viabilidade da sua aplicação a estudos de caso.

Por fim, serão evidenciadas as principais conclusões retiradas do desenvolvimento desta dissertação.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em sete capítulos. O primeiro consiste num enquadramento geral do tema, no qual estão apresentados aspetos relevantes para o desenvolvimento desta temática na conjuntura atual, a motivação do autor no contexto académico-profissional, e os principais objetivos.

O segundo capítulo consiste numa introdução não exaustiva do tema das vias férreas balastradas, descrevendo os seus principais componentes e patologias associadas. É também feita uma revisão bibliográfica do tema palmilhas de travessa.

O terceiro capítulo é dedicado essencialmente à modelação numérica no programa Pegasus, fundamentando os seus princípios de funcionamento.

No quarto capítulo é feita a análise de um ensaio experimental realizado no Irão, e a sua reprodução para validar o modelo numérico.

O quinto capítulo é dedicado a um estudo paramétrico, no qual se faz uma análise estática para perceber a influência da rigidez vertical dos elementos resilientes (palmilhas de carril e travessa) no deslocamento vertical do carril, é desenvolvida uma metodologia expedita para pré-dimensionar palmilhas de travessa com base neste estudo paramétrico.

No sexto capítulo são modelados dois estudos de caso: uma variação brusca de rigidez da fundação e uma via com desgaste ondulatório, para aferir se a metodologia de pré-dimensionamento desenvolvida com base em cargas estáticas é aplicável em modelos com cargas dinâmicas.

Por ultimo, o sétimo capítulo é um resumo das conclusões retiradas desta dissertação e sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos de investigação.

Capítulo 2

Via férrea descrição genérica e problemáticas

2.1 Via férrea generalidades

A via ferroviária tem a função de guiar o material circulante de uma forma segura, económica e confortável, assegurando a transmissão adequada de cargas desde os carris até à fundação. Esta pode ser subdividida em dois grandes grupos tendo em conta os materiais utilizados:

- Via balastrada.
- Via não balastrada ou em laje.

A escolha do tipo de via a construir deve ter em conta uma análise multi-critério de forma a incluir os seguintes itens: as vantagens e desvantagens de cada sistema, a experiência acumulada, a rapidez de execução, a disponibilidade de matérias primas, o custo do ciclo de vida e alguns aspetos ambientais: ruído, vibrações, exploração de matérias primas, etc.(Vale, 2010).

Em Portugal, tradicionalmente, a escolha recai no sistema de via balastrada, que oferece um dos melhores compromissos entre a rigidez e o amortecimento (Fortunato, 2005). Esta escolha é suportada pela existência de pedreiras naturais em Portugal, tornando o balastro um material acessível e de relativo baixo custo.

Neste documento é abordada apenas a via balastrada com aplicação de palmilhas de travessa. Estes elementos, devido ao seu comportamento resiliente, têm potencial para mitigar alguns dos aspetos ambientais citados, aumentando assim as qualidades já intrínsecas a este sistema de via.

2.2 Elementos constituintes da via balastrada

A estrutura de uma via balastrada pode ser dividida em duas zonas: a super-estrutura e a sub-estrutura. A primeira é constituída pelos seguintes elementos: o carril, as palmilhas de carril, as fixações, as travessas, e nalguns casos, as palmilhas de travessa. À segunda pertencem as seguintes camadas: balastro, sub-balastro, coroamento e fundação. Alguma da bibliografia da especialidade considera o balastro pertencente à super-estrutura. Neste documento opta-se pela descrição acima feita por uma questão de simplicidade, e assim, a estrutura da via é separada em armadura da via e camadas granulares.

A Figura 2.1, apresenta um desenho esquemático da estrutura de uma via balastrada moderna, onde estão representados os seus elementos e camadas excetuando as fixações. Os elementos da super-estrutura e o balastro são considerados de elevado desgaste, ao passo que, o sub-balastro e as camadas subjacentes têm um ciclo de vida bastante superior, na ordem de 50 a 100 anos, caso sejam realizadas de forma adequada as tarefas de conservação e reabilitação da via (Fortunato, 2005).

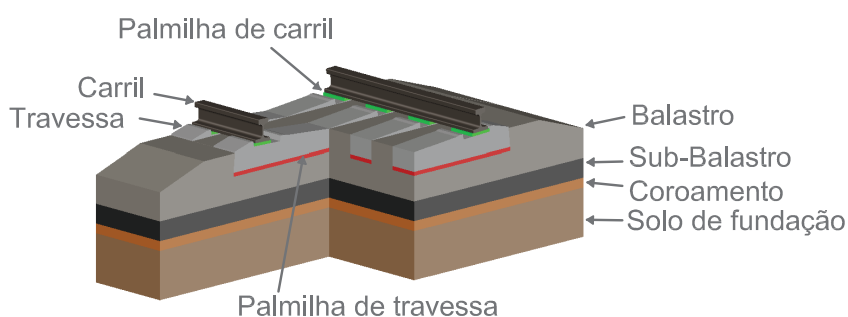


Figura 2.1: Esquema de uma via balastrada com palmilhas de travessa

Neste capítulo é feita, de forma não exaustiva, a descrição dos elementos da estrutura da via, referindo as suas funções principais e alguns mecanismos de falha.

2.2.1 Carril

Os carris são os elementos mais a montante do sistema de transmissão de cargas de uma via ferroviária convencional, podendo ser equiparados a vigas metálicas com apoios discretos quando instalados sobre travessas.

A evolução da sua secção transversal consistiu no aumento: da área da cabeça, da altura da alma e no alargamento do patim, o que conduziu a massa mais elevada por metro linear de carril. A sua instalação, passou de um sistema com juntas para barras longas soldadas (BLS) com um sistema de soldadura aluminotérmica.

Os carris têm a função de impor direção às rodas e distribuir as solicitações a que estão sujeitos para os elementos subjacentes, neste caso as travessas, e conduzir energia elétrica, algo essencial para o funcionamento dos sistemas de sinalização e controlo da via (Fontul, 2015).

As cargas transmitidas pelos veículos ferroviários aos carris são também tradicionalmente divididas em componente pseudo-estática e componente dinâmica. A componente estática é devida ao peso próprio do material circulante, e as solicitações dinâmicas são devidas a defeitos da roda e/ou irregularidades do carril e à dinâmica do veículo. Devido à sua natureza cíclica estas ações dinâmicas contribuem ativamente para a degradação da via e do material circulante.

Os principais modos de falha do carril são: desgaste da cabeça do carril em curvas devido a fricção com o verdugo da roda, deformações devido a cargas verticais elevadas, além da fendilhação, fadiga e desgaste ondulatório.

2.2.2 Palmilhas de carril (RP)

As palmilhas de carril (RP¹) são elementos normalmente de elevada resiliência instalados entre o carril e a travessa. A sua introdução em sistemas ferroviários tornou-se uma prática comum com a utilização de travessas de betão. Na sua fabricação normalmente empregam-se materiais resilientes como: borracha, polietileno de alta densidade (PEAD), elastómeros termoplásticos (TPE), ou etileno-acetato de vinilo (EVA) (Sol-Sánchez et al., 2015).

Este componente tem a função de melhorar a distribuição de carga, amortecer as vibrações transmitidas do carril para as travessas, proporcionando com isto uma condução suave, prevenir a fendilhação das travessas de betão, e fornecer isolamento elétrico entre carris (Sol-Sánchez et al., 2015).

As RP por serem fabricadas em polímeros termoplásticos e elastómeros, apresentam um comportamento não-linear. A sua rigidez vertical aumenta com a frequência de aplicação da carga, com a pré-carga e com a vida útil; e diminui com o aumento da temperatura. Devido à complexidade associada à representação deste comportamento, normalmente adota-se um modelo de comportamento linear representado pela tangente à rigidez vertical para a carga de projeto ou o valor secante ao intervalo de cargas de projeto (Sol-Sánchez et al., 2015).

As RP rígidas são mais duráveis, contudo, promovem maior degradação das travessas e tornam mais agressivo o contacto roda-carril por terem menos capacidade de absorver energia. A tendência apresentada tem sido reduzir a rigidez vertical destes elementos, uma vez que estes são de fácil substituição comparativamente aos restantes.

Um dos principais modos de falha dos elementos resilientes utilizados em

¹ Abreviatura proveniente do termo inglês Rail Pad

vias férreas, nos quais estão incluídas as palmilhas de carril, é a deterioração produzida pelos agentes ambientais tais como a temperatura, a oxidação, ou a hidrólise. Por esta razão, eles têm uma vida útil de cerca de 20 anos (Sol-Sánchez et al., 2015).

2.2.3 Fixações

O sistema de fixação tem como função transmitir as cargas do carril para a travessa, garantir a bitola da via e a inclinação do carril. Existem inúmeros sistemas de fixação, sendo crucial na sua escolha a facilidade de substituição para não condicionar a vida útil das travessas (Vale, 2010). A Figura 2.2, apresenta como exemplo uma fixação tipo Vossloh.



Figura 2.2: Fixação tipo Vossloh, retirado de (Esveld, 2001)

2.2.4 Travessas

As travessas são colocadas entre os carris e a camada de balastro, normalmente com um espaçamento longitudinal de 60 cm, salvo algumas exceções. Estas têm como função distribuir cargas, suportar o sistema de fixação e impedir os movimentos dos carris preservando assim a sua inclinação e a bitola da via (Fortunato, 2005).

Estes elementos, inicialmente construídos quase exclusivamente em madeira, podem presentemente ser fabricados com diversos materiais, incluindo materiais sintéticos como resíduos de plástico, embora na atualidade a maioria seja fabricada em betão armado.

O presente documento apenas incide sob as travessas tipo monobloco em betão pré-esforçado. As suas dimensões têm vindo a aumentar, contribuindo para uma redução da tensão aplicada ao balastro e um aumento da estabilidade lateral da via. Contudo, esta opção leva a um aumento do seu peso o que acarreta maiores dificuldades de manuseamento (Fortunato, 2005).

A durabilidade das travessas pode ser afetada por fenómenos químicos (Vale, 2010), pela qualidade da fundação e pela evolução do estado de compactação da camada de balastro, entre ataques de via. Uma travessa mal apoiada pode estar

sujeita a esforços de flexão, promovendo o aparecimento de fendas (Fortunato, 2005). A sua vida útil deve ser superior a 40 anos (Vale, 2010).

2.2.5 Palmilhas de travessa (USP)

Aplicação de USP em vias ferroviárias

As palmilhas de travessa (USP ²) são elementos resilientes, instalados na base das travessas como pode ser visto na Figura 2.3. Apesar de utilizadas há mais de duas décadas, o seu uso aumentou significativamente com a expansão recente de vias de alta velocidade, apresentado uma alternativa ao aumento da espessura da camada de balastro que acima de um certo valor comprometer a sua estabilidade devido à inerente dificuldade de compactação (Sol-Sánchez et al., 2015).



Figura 2.3: Instalação de palmilhas de travessa, retirado de (Paixão, 2014)

Na sua fabricação são empregues materiais resilientes tais como: elastómetro de poliuretano, borracha e etileno acetato de vinilo (EVA); normalmente são constituídas por uma camada celular interior com a função de amortecimento e uma camada elástica com a função de proteger dos contactos agressivos como por exemplo a sua interação com o balastro (Sol-Sánchez et al., 2015).

A instalação destes elementos na via férrea permite a mobilização de mais travessas para distribuir as cargas impostas aos carris. Isto leva a que a distribuição de carga se faça numa maior área de balastro. Ainda, em ensaios realizados por (Sol-Sánchez et al., 2014) para testar a viabilidade de utilização de USPs, fabricadas com pneus em fim de vida, concluiu-se que estas USP aumentam a área de contacto entre a travessa e o balastro em 10%, ficando abaixo de outros estudos com USP que indicam um valor entre 25 a 33% (Loy e Augustin, 2015; Gräbe et al., 2016).

Em suma a utilização de USP reduz a tensão de contacto entre a travessa e o balastro de duas formas distintas: alterando a distribuição de cargas nas travessas e distribuindo a força transmitida à travessa numa maior área de contacto com o balastro. Contudo, a par com a redução de tensões, as USP provocam o aumento da flexibilidade da via, aumentando os deslocamentos verticais no carril. Este efeito importa ser rigorosamente estudado.

²Abreviatura proveniente do termo inglês Under Sleepers Pads

Algumas das problemáticas do comportamento da via, subsequentes da instalação de USP em zonas de transição, podem ser analisadas em (Paixão, 2014), de onde ressalta a importância do correto dimensionamento destes elementos em sintonia com as palmilhas de carril.

Rigidez estática da USP

As USPs são fabricadas com elastómeros, logo são válidas as considerações expostas na Secção 2.2.2, no que diz respeito ao comportamento não linear e aos modos de falha.

Regra geral, as USP são caracterizadas pela sua rigidez estática por unidade área. Atendendo ao facto dos elastómeros serem materiais quase incompressíveis, estes evidenciam uma relação tensão-deformação dependente da sua forma geométrica (Guerreiro, 2003). Ao analisar a Figura 2.4, considerando que a força aplicada é igual nos dois blocos de elastómero e distribuída de maneira uniforme pela placa rígida, o bloco mais alto apresentará uma deformação maior devido essencialmente à distorção.

A rigidez vertical K_v pode assim ser obtida pela Equação (2.1), correspondente a um modelo de duas molas em série, uma corresponde a contribuição da componente de distorção, obtida pela Equação (2.2), e outra à componente volumétrica, obtida pela Equação (2.4).

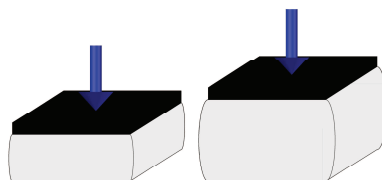


Figura 2.4: Esquema de deformação de um bloco de elastómero, adaptado de (Guerreiro, 2003)

$$\frac{1}{K_v} = \frac{1}{K_v(\gamma)} + \frac{1}{K_v(\nu)} \quad (2.1)$$

Em que: $K_v(\gamma)$ corresponde à rigidez da componente de distorção e $K_v(\nu)$ corresponde à rigidez da componente volumétrica.

$$K_v(\gamma) = \beta_2 \frac{GS^2 A_c}{h} \quad (2.2)$$

Em que β_2 é um coeficiente que depende da forma da secção carregada e que pode ser obtido através da Tabela 2.1, G é o módulo de distorção, S é um fator de forma obtido pela Equação (2.3) e h corresponde à altura do bloco de elastómero.

$$S = \frac{A_c}{A_l} \quad (2.3)$$

Em que A_c corresponde à área carregada pela placa rígida representada na Figura 2.4 e A_l é a área livre das faces laterais do bloco de elastómero.

A rigidez da componente volumétrica $K_v(\nu)$ é obtida por sua vez por:

$$K_v(\nu) = \frac{E_b A_c}{h} \quad (2.4)$$

Em que E_b é o modulo de compressibilidade.

Tabela 2.1: Valor do coeficiente β_2 , adaptado de (Guerreiro, 2003)

β_2	(Kelly, 1993)	(CEN/TC 167, 2001)
Bloco com secção circular	6	5
Bloco com secção quadrada	6.63	5

Assumindo que a USP apresenta um comportamento equiparado a uma camada fina de elastómero, a sua deformação horizontal dá-se essencialmente por corte. Assim sendo, a sua rigidez horizontal K_h pode ser obtida por uma relação entre as suas dimensões geométricas e o módulo de distorção G . Esta relação é obtida pela Equação (2.5).

$$K_h = \frac{G A_c}{h} \quad (2.5)$$

Trabalhos de investigação sobre USP

Uma das primeiras experiências com USP remonta à década de 70 na Linha Tokaido-Shinkasen no Japão, onde se conclui que as USP são eficientes na redução de vibrações no balastro e consequentemente na sua deterioração (Pita, 2006); outra experiência foi realizada em 2003, numa Linha em Copenhaga na Dinamarca, com o intuito de reduzir a espessura da camada de balastro, apresentando igualmente bons resultados (Sol-Sánchez et al., 2015). Uma experiência realizada entre 1997 e 2003, numa ponte na Linha Hannover-Göttingen na Alemanha evidenciou também uma redução da taxa de defeitos culminando assim num maior intervalo de tempo entre as operações de manutenção; podem ser obtidas mais informações sobre o tema em (Pita, 2006). Salientam-se ainda dois estudos relativamente ao desgaste ondulatório ferroviário em curvas de pequeno raio, realizados na República Checa e na Austrália, e que comprovam a redução dos comprimentos de onda e das amplitudes deste defeito (Sol-Sánchez et al., 2015).

Num estudo realizado no Irão foram comparadas duas vias paralelas com e

sem a instalação de USP, com o intuito de aferir o efeito na transmissão de vibrações a varias distâncias do eixo da via. O autor (Jabbar et al., 2015) conclui que as USP são eficientes a reduzir vibrações na gama de 40-80 Hz, sendo a máxima eficiência nos 50 Hz. No Capítulo 4, será feita a análise destes dados e a modelação numérica deste estudo experimental.

Em Portugal foram instaladas USP na Linha do sul numa passagem superior com blocos técnicos a montante e jusante da mesma, e comparada com uma passagem superior semelhante da mesma via sem USP (Paixão et al., 2015). O autor chega à conclusão que a instalação de USP aumentou significativamente os deslocamentos verticais da via e as acelerações nas travessas, e salienta a importância de efetuar estudos focados na monitorização a longo prazo.

Na Linha de Sintra em Portugal, na zona da passagem inferior dos Missionários, foi aplicada uma solução conjunta de USP e manta de balastro com o objetivo de reduzir o ruído ferroviário (Andrade, 2013), contudo a autora não dispõe de dados que comprovem a eficiência da solução.

Através do levantamento bibliográfico sobre USP, é possível classificar os aspetos positivos da sua utilização em três níveis: o contacto entre a travessa e balastro, a nível global da via e aspetos ambientais.

Ao nível do contacto vertical entre a travessa e o balastro salientam-se as seguintes vantagens:

- Redução da dureza de contacto.
- Aumento da superfície de contacto.
- Redução da tensão na superfície do balastro.

Ao nível do comportamento global da via foram identificadas as seguintes características:

- Aumento da elasticidade vertical.
- Redução do desenvolvimento de defeitos geométricos da via a longo prazo.
- Redução dos custos de manutenção.

No que diz respeito a aspetos de carácter ambiental:

- Reduz a exploração de balastro devido ao aumento da vida útil do mesmo.
- Reduz as vibrações com frequências superiores a 40 Hz.
- Reduz o ruído ferroviário.

Como aspetos menos positivos ou menos claros da utilização de USP, pode-se identificar:

- Aumento eventualmente excessivo dos deslocamentos verticais, no eixo do material circulante, no carril e na travessa.
- Aumento da energia consumida pelo material circulante devido ao acréscimo de flexibilidade da via.
- Opiniões contraditórias a respeito da estabilidade lateral da via.

2.2.6 Balastro

O balastro ferroviário é uma camada na generalidade dos casos com 30 cm de espessura composto por partículas angulosas (25 a 50 mm) e apresenta um grande volume de vazios bem como um fuso granulométrico fechado. As características deste material e o seu desempenho são das principais preocupações das empresas ferroviárias (Fortunato, 2005).

Esta camada serve de apoio às travessas e transmite as forças aplicadas com tensões adequadas às camadas inferiores, permitindo também o escoamento de águas e poluentes no sentido descendente (Fortunato, 2005). Pode afirmar-se que esta camada é responsável pelas principais qualidades deste sistema estrutural, nomeadamente, o compromisso entre rigidez e amortecimento e a versatilidade na correção geométrica da via devido à possibilidade de rearranjo mais ou menos fácil das partículas de balastro.

O seu comportamento é complexo: as forças verticais são equilibradas pela resistência direta das partículas, as laterais e longitudinais essencialmente por atrito (Fortunato, 2005); a sua granulometria e a forma das partículas modificam-se durante a sua vida útil devido ao historial de ações a que este está sujeito, o que torna difícil caracterizar matematicamente o seu comportamento a longo prazo. A título de exemplo, caso o balastro esteja colmatado com finos a rigidez aumenta, contudo, se não estiver colmatado e as partículas tiverem perdido as angulosidades a sua rigidez diminui.

Os seus modos de falha estão essencialmente ligados à perda de angulosidades das partículas, à fratura de partículas por carga excessiva, e à contaminação com finos, podendo estes ser externos ao mesmo ou partículas finas provenientes da alteração de granulometria.

2.2.7 Sub-balastro

O sub-balastro é uma camada localizada entre o balastro e o coroamento caso este exista, ou fundação, como pode ser visto na Figura 2.1. Pode ser formado

por agregados britados com um fuso granulométrico extenso, e não só impede a penetração dos agregados grosseiros de balastro na fundação, como funciona como elemento filtrante, impedindo a ascensão de finos da fundação. Esta camada também tem as funções de impermeabilizante e drenante impedindo que águas descendentes cheguem à fundação (Fortunato, 2005; Vale, 2010).

A introdução desta camada, na conceção estrutural da via, é uma solução que permite manter aproximadamente constante ao longo da via a espessura da camada de balastro e controlar o nível de tensão sobre a fundação (Fortunato, 2005).

2.2.8 Coroamento

A camada de coroamento normalmente é utilizada quando o leito de fundação não apresenta as características adequadas, funcionando como uma camada de reforço. Esta normalmente é constituída por solo de boa qualidade, e pode ser uma opção à adoção de uma grande espessura de sub-balastro (Alves, 2010).

2.2.9 Fundação da via

A fundação da via é normalmente executada em aterro ou escavação, sendo relativamente normal que estas zonas possam ter vários metros de altura devido à pouca flexibilidade das vias ferroviárias em acompanhar a orografia natural do terreno. Pode ser subdividida em fundação geral e leito da via (Fortunato, 2005). Apesar das solicitações do tráfego se fazerem sentir até 7 a 8 metros é normal existir uma preocupação especial entre 1 a 2 metros abaixo da base da travessa (Fortunato, 2005). Esta deve apresentar uma capacidade de carga adequada aos trabalhos de construção da via e a longo prazo não deve apresentar deformações elásticas nem plásticas excessivas.

A camada de fundação desempenha um papel importante no desempenho da via férrea, podendo ter uma contribuição significativa nos deslocamentos presentes ao nível do carril. Importa salientar que em geral nas obras de engenharia civil a caracterização geotécnica tem sempre incerteza associada elevada, por mais ensaios que se realizem. Considerando o caso das vias de comunicação em particular, devido ao seu grande desenvolvimento longitudinal este facto torna-se ainda mais significativo.

Uma das técnicas para controlar a qualidade da fundação *in situ* é caracterizar o seu módulo de deformabilidade equivalente.

O módulo de deformabilidade pode ser obtido realizando ensaios de carga em placa estáticos (ECP³). Sucintamente, o ECP consiste em aplicar numa placa

³Ensaio de carga em placa

rígida normalizada uma pré-carga e dois ciclos de carga conhecidos, medindo os deslocamentos (Martins et al., 2008). Pela relação entre a tensão e o deslocamento obtêm-se o módulo de deformabilidade. Este módulo é apresentado segundo duas nomenclaturas: E_{v1} correspondente ao primeiro ciclo de carga, e E_{v2} ao segundo ciclo de carga. Em geral o parâmetro E_{v2} é usado como critério de aceitação de terraplanagens.

Uma técnica mais expedita de caracterizar o módulo de deformabilidade da fundação são os ensaios dinâmicos, contudo apresentam alguns condicionalismos discutidos em (Fortunato, 2005). Destes ensaios identifica-se os seguintes: deflectómetro de impacto pesado (FWD)⁴, deflectómetro de impacto portátil (DIP) e o medidor de capacidade de suporte em contínuo (MCSC)⁵.

⁴Deflectómetro de impacto pesado, termo proveniente do inglês *Falling Weight Deflectometer*

⁵Termo original *Portancemètre*, Medidor de capacidade de suporte em contínuo (MCSC)

Capítulo 3

Modelação da via

A modelação da via férrea é um tema em constante investigação e desenvolvimento, e que essencialmente surgiu com a necessidade de dimensionar este tipo de estruturas e perceber algumas das suas patologias. Um dos primeiros modelos desenvolvidos foi o de Winkler em 1867. Desde aí têm sido desenvolvidos modelos cada vez mais complexos consoante a necessidade de extrair mais informação dos mesmos. Um dos aspetos mais influentes no desenvolvimento dos modelos computacionais tem sido o aumento do poder computacional associado aos métodos numéricos. Sai fora do âmbito deste documento descrever a evolução histórica da modelação de vias férreas, pretende-se neste capítulo explorar alguns dos princípios de cálculo do programa "Pegasus", para explicar os princípios subjacentes aos resultados obtidos na presente dissertação.

3.1 Pegasus - programa de cálculo 3D

O "Pegasus" é um programa que permite representar vias férreas, através de um modelo tridimensional, como está representado na Figura 3.1. Este programa permite calcular a resposta dinâmica da via através de métodos numéricos. O seu desenvolvimento em linguagem Matlab (Math Works Inc.,2009) iniciou nos trabalhos de doutoramento de Varandas (2013a) e encontra-se em constante evolução no decorrer dos projetos de investigação do autor. O "Pegasus" tem como particularidades: o cálculo dinâmico, a possibilidade de considerar a não linearidade dos materiais da sub-estrutura, a possibilidade de simular travessas flutuantes e introduzir o nivelamento e irregularidades da via.

Para resolver o problema, o programa separa o sistema estrutural formado pelo veículo, via, e a sua fundação em três sub-sistemas independentes mas acoplados, como pode ser visto no organograma da Figura 3.2. A super-estrutura é constituída: pelos carris, pelas palmilhas de carril e pelas travessas; a sub-estrutura é constituída pelo balastro e as restantes sub-camadas

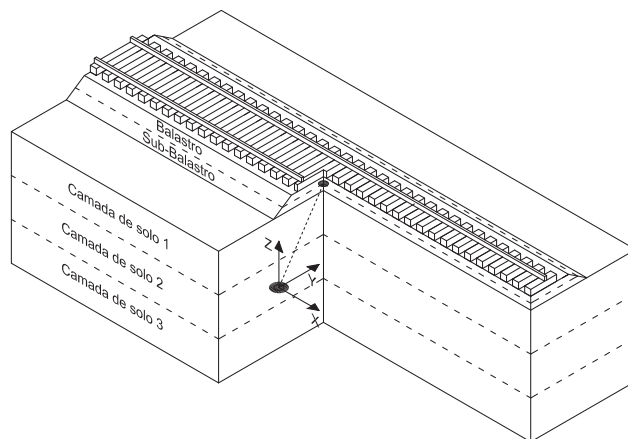


Figura 3.1: Modelo 3D do Pegasus, adaptado de (Varandas, 2013a))

consideradas. O modelo de veículo será descrito em secção própria mais à frente.

Os dois sub-sistemas via/balastro-solo estão ligados através de forças de interação entre as travessas e o balastro, e estas são devidas ao contacto vertical entre a base da travessa e o balastro, e à fricção entre as faces laterais da travessa e o balastro. O formalismo matemático relativo ao cálculo destas forças de interação será apresentado mais a frente.

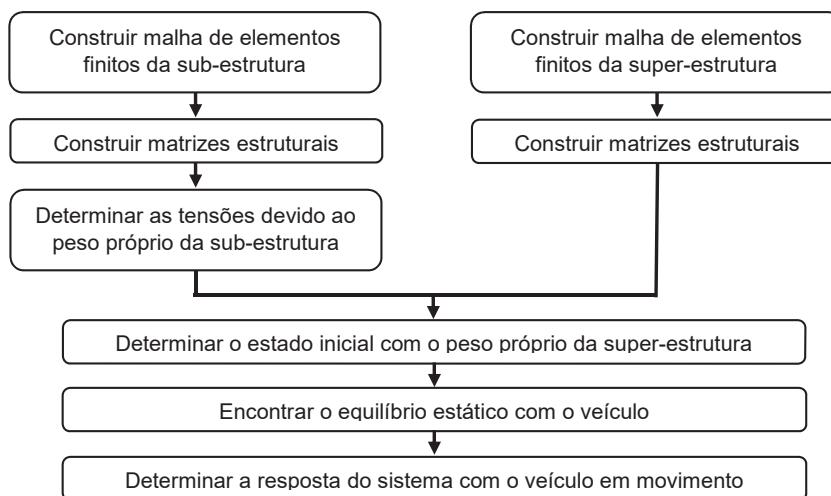


Figura 3.2: Etapas de cálculo do Pegasus, adaptado de (Varandas, 2013a))

3.2 Pegasus - princípios matemáticos subjacentes

O programa "Pegasus" utiliza o método dos elementos finitos com a formulação em deslocamentos que permite obter soluções aproximadas dos sistemas de equações diferenciais que regem o problema em estudo. A representação espacial

de uma dada realidade faz-se através da sub-divisão desta em elementos finitos, que devem ser tão pequenos quanto o necessário para que a resposta assim obtida dependa o menos possível da correspondente malha de elementos finitos. Podem ser obtidas mais informações sobre o tema na bibliografia da especialidade (Hughes, 2012).

O método de integração no tempo implementado foi um método explícito apresentado em (Zhai,1996). Este, consiste em puras operações vetoriais, evitando a resolução do sistema de equações, desde que a matriz de massa permaneça diagonal. Os valores da resposta a calcular na presente etapa dependem apenas dos obtidos na etapa anterior, de modo a que a análise prossiga. Para que este método seja estável é necessário que o passo de tempo de cálculo seja pequeno (Zhai,1996).

Os carris e as travessas são modelados por elementos finitos de viga segundo a teoria da viga de Euler-Bernoulli, o que implica não considerar a deformação por corte. Nestes elementos de viga foram considerados 5 graus de liberdade por nó desprezando a rotação por torção. Os carris encontram-se ligados às travessas por um sistema de mola amortecedor nas 3 direções, este representa o comportamento das palmilhas de carril e fixações. A sub-estrutura é modelada com elementos finitos sólidos hexaédricos de oito nós. A cada nó correspondem três graus de liberdade o que perfaz um total 24 graus de liberdade por elemento (Varandas, 2013a).

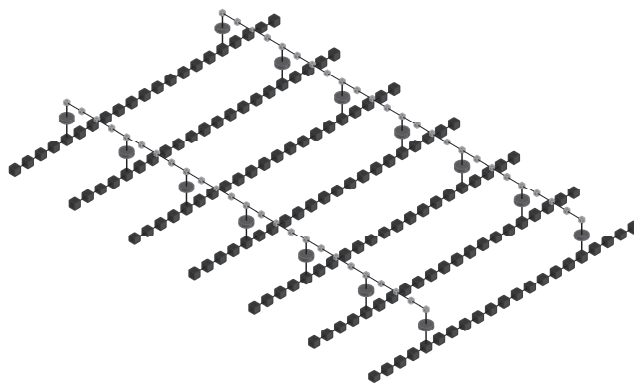


Figura 3.3: Esquema do modelo de elementos finitos da super-estrutura, adaptado de (Varandas, 2013a))

As equações de movimento que regem o modelo matemático são as seguintes:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_v \mathbf{u}_v + \mathbf{C}_v \mathbf{v}_v + \mathbf{M}_v \mathbf{a}_v = \mathbf{f}_{g.v} + \mathbf{f}_{a.w} \\ \mathbf{K}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{C}_t \mathbf{v}_t + \mathbf{M}_t \mathbf{a}_t = \mathbf{f}_{g.t} - \mathbf{f}_{a.w} + \mathbf{f}_{a.b} \\ \mathbf{K}_s \mathbf{u}_s + \mathbf{C}_s \mathbf{v}_s + \mathbf{M}_s \mathbf{a}_s = \mathbf{f}_{g.s} - \mathbf{f}_{a.b} \end{cases} \quad (3.1)$$

Os índices v , t e s referem-se: ao veículo, à super-estrutura, e à sub-estrutura respetivamente. \mathbf{K} , \mathbf{M} e \mathbf{C} são as matrizes de rigidez, de massa e de

amortecimento dos respetivos sub-sistemas indicados pelos índices; u , v e a são os vetores nodais dos deslocamentos, das velocidades e das acelerações; f_g , $f_{a.w}$ e $f_{a.b}$ correspondem aos vetores de forças gravíticas, de interação veículo-via, e de interação travessa-balastro respetivamente.

O Pegasus adota o método da fronteira absorvente (MFA). Sempre que as dimensões de um modelo de elementos finitos não incluam todo o campo de deslocamentos gerado, isto implica que se preveja um método para absorver as ondas que atingem as fronteiras do modelo, que caso contrário serão refletidas para o interior do modelo.

Estão implementados dois modelos constitutivos possíveis para o comportamento da sub-estrutura: o modelo linear elástico regido pela Lei do Hooke, e o modelo não linear $K-\theta$ que faz depender a rigidez do material do estado de tensão. Podem ser encontradas mais informações sobre este tema em (Varandas, 2013a). Nos estudos aqui realizados foi utilizado o modelo de comportamento linear.

As matrizes C_t e C_s foram determinadas segundo a teoria de amortecimento de Rayleigh.

3.3 Pegasus interação travessa-balastro

Os estudos efetuados nesta dissertação representam o comportamento das palmilhas de travessa, através da alterando dos parâmetros de contacto das forças de interação.

A interação entre a travessa e o balastro é proporcional ao deslocamento relativo entre o nó da travessa e o nó subjacente de balastro, seguindo-se uma formulação para problemas de contacto tipo *Penalty* que permite que exista ou não contacto entre os respetivos nós dos dois sub-sistemas. Esta força dinâmica depende de dois parâmetros de contacto: K_c a rigidez e o amortecimento C_c , conforme se mostra na correspondente Equação (3.2).

$$F_{a.b.i} = \begin{cases} k_{c.i}(u_{t.i} - u_{s.i} - h_i) + c_{c.i}(v_{t.i} - v_{s.i}), & \text{se } u_{t.i} - u_{s.i} < h_i \\ c_{c.i}(v_{t.i} - v_{s.i}), & \text{se } u_{t.i} - u_{s.i} \geq h_i \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde $F_{a.b.i}$ corresponde à força de interação entre dois nós sobrepostos, um pertencente à travessa e outro ao balastro, identificados respetivamente por t_i e s_i na Figura 3.4, $k_{c.i}$ e $c_{c.i}$ correspondem aos parâmetros de contacto e de fricção, $u_{t.i}$ e $u_{s.i}$ os correspondentes deslocamentos, $v_{t.i}$ e $v_{s.i}$ as correspondentes velocidades, h_i corresponde a um possível vazio existente entre a travessa e o balastro no caso de travessas flutuantes.

Analisando a Equação 3.2 é facilmente perceptível que caso exista contacto, esta força depende da rigidez e do amortecimento. Caso este não exista está simplesmente dependente do amortecimento, simulando-se neste caso apenas

a fricção que deverá existir entre as paredes laterais da travessa e o balastro envolvente. A respeito da interação lateral esta segue uma formulação idêntica (Barreto, 2016).

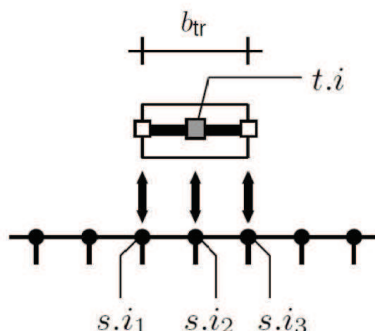


Figura 3.4: Esquema da direção transversal da travessa, adaptado de (Varandas, 2013a)

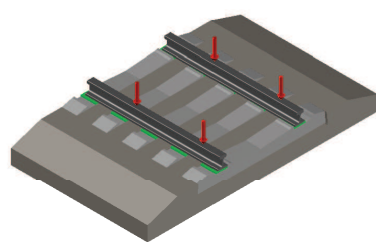
A travessa é modelada com elementos de viga. Como tal, a sua dimensão transversal não tem representatividade física no modelo, consequentemente, um nó da travessa será ligado a vários nós correspondentes no balastro. Na Figura 3.4, a um nó da travessa correspondem três nós do balastro. O cálculo dos parâmetros de contacto dos quais dependem as forças de interação travessa-balastro podem ser obtidos pela Equação 3.3, estes dependem da dimensão transversal da travessa e do respetivo comprimento de influência na direção longitudinal da mesma.

$$k_{c,i} = \frac{K_c L_{inf}}{n}; \quad c_{c,i} = \frac{C_c L_{inf}}{n} \quad (3.3)$$

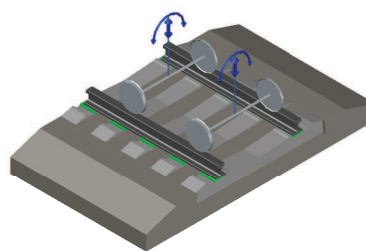
Em que L_{inf} é o comprimento de influência do nó na direção longitudinal da travessa e (n) o número de nós no balastro a que será ligado um nó da travessa. Na Figura 3.4 seriam 3 nós.

3.4 Pegasus modelos de veículo

Este programa permite utilizar veículos em que estão modeladas apenas as massas não suspensas, como pode ser visto na Figura 3.5. O modelo mais simples corresponde à Figura 3.5 (a), em que as setas vermelhas representam forças. Apesar de estarem apenas representadas na direção vertical é possível considera-las nas três direções principais. A Figura 3.5 (b), corresponde ao modelo do eixo de rodados, onde as setas azuis representam os graus de liberdade, dois por eixo de rodados.



(a) Forças

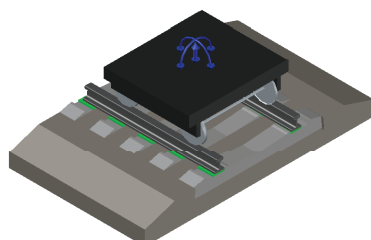


(b) Eixo

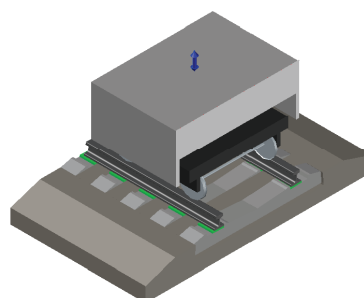
Figura 3.5: Modelos de veículos de massas não suspensas

Na Figura 3.6 (a) está representada a massa suspensa do corpo da bogie e os três graus de liberdade adicionais relativamente a esta. Este modelo de veículo têm no total sete graus de liberdade. A Figura 3.6 (b) consiste numa alteração recente, em que se adicionou um grau de liberdade para simular metade da carga da caixa do veículo.

Esta alteração ao modelo anterior permite estudar, com algumas reservas, as acelerações verticais a que os passageiros estão sujeitos quando surgem defeitos na via ou quando se testam soluções para atenuar as consequências dos defeitos da via, como pode ser o caso particular das USP.



(a) Bogie



(b) Bogie com grau de liberdade adicional

Figura 3.6: Modelos de veículos com massas suspensas e não suspensas

Capítulo 4

Modelação de ensaios experimentais

4.1 Introdução

Neste capítulo analisa-se a propagação de vibrações induzidas pelo material circulante na linha férrea Iraniana entre Mashhad e Tehran. Esta linha foi instrumentada com geofones e tem a particularidade de ter duas vias paralelas, numa das quais estão instaladas palmilhas de travessa (USP), como mostra a Figura 4.1. Nesta Figura pode observar-se que foram instalados três geofones (G1, G2 e G3) na zona da via com USP e outros três geofones (G4, G5 e G6) na zona da via sem USP. Os geofones (G1 e G4) foram colocados à superfície do balastro. Os trabalhos de instrumentação e aquisição de dados foram realizados por (Jabbar et al., 2015) e disponibilizados para a realização deste estudo.

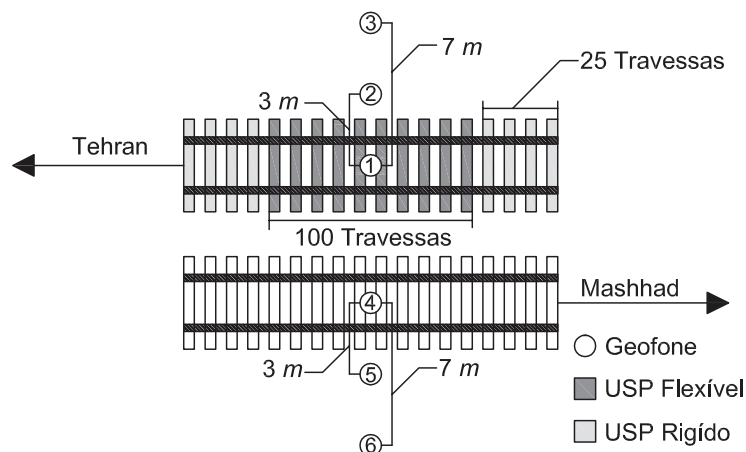


Figura 4.1: Esquema da instrumentação da via, adaptado de (Jabbar et al., 2015)

Posteriormente, pretende-se desenvolver e calibrar um modelo numérico tridimensional no programa "Pegasus", que reproduza o comportamento das vias,

para retirar algumas ilações a respeito dos elementos da via não instrumentados.

4.2 Instrumentação da via

As vias férreas em estudo são balastradas, sendo a sua super-estrutura constituída por: carris 60E1, palmilhas de carril rígidas e travessas de betão pré-esforçado tipo mono-bloco em bitola europeia. Numa das vias foram instaladas 100 USP de baixa rigidez estática $0,13 \text{ N/mm}^3$. Para evitar um aumento de rigidez nos troços adjacentes, foram instaladas 25 USP com rigidez mais elevada $0,3 \text{ N/mm}^3$ (Jabbar et al., 2015), como pode ser visto na Figura 4.1. Na secção 4.4 serão apresentados mais dados sobre a via.

É possível observar na Tabela 4.1, um resumo das especificações técnicas da via de referência sem USP e da via com USP. No trabalho experimental realizado por (Jabbar et al., 2015), foram utilizados geofones DT-20DX-4,5 Hz; cuja gama de sensibilidade varia entre 4,5 a 500 Hz, com uma tolerância de $\pm 0,5 \text{ Hz}$. O sistema de aquisição e gravação de dados utilizado é da Marca ABEM, modelo RAS-24, com uma frequência máxima de gravação de 3,3 kHz.

Os dados obtidos, correspondem à passagem em cada uma das vias de comboios de passageiros similares, a uma velocidade de 80 km/h. O ensaio experimental consistiu na gravação das velocidades verticais durante 32 segundos, com uma frequência de aquisição de dados de 500 Hz.

No trabalho experimental realizado por (Jabbar et al., 2015) foi possível concluir que as USP são eficientes a reduzir vibrações na gama de 40-80 Hz. Contudo a sua máxima eficiência está nos 50 Hz.

Tabela 4.1: Parâmetros da linha férrea Mashhad-Tehran, adaptado de (Jabbar et al., 2015)

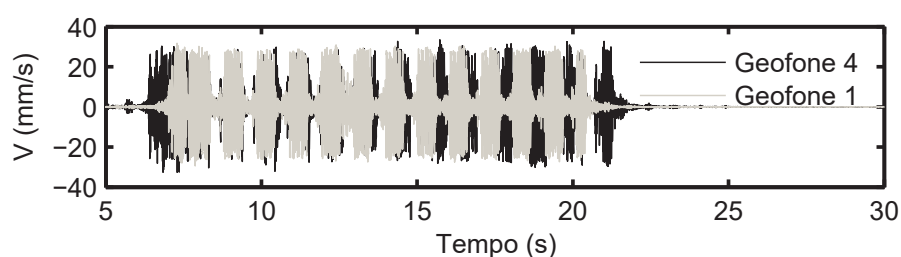
Elementos da via	Via de referência	Zona de transição	Zona central
Carril	60E1	60E1	60E1
Palmilha de carril	Rígida	Rígida	Rígida
Travessa	B70	B70	B70
USP	N/A	SLB 3007 G	SLB 1308 G
Rigidez do USP N/mm^3	N/A	0.3	0.13

4.3 Análise dos dados experimentais

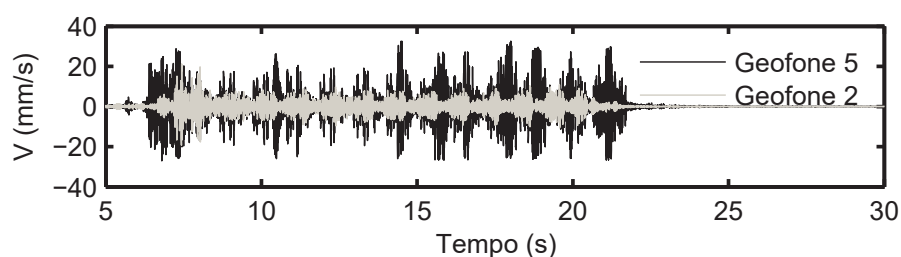
Para efetuar uma análise de dados dentro da margem de precisão dos geofones, foi aplicado um filtro ao sinal obtido para cortar as frequências abaixo de 4,5 Hz, que corresponde à frequência natural dos geofones.

Através da análise da Figura 4.2, que apresenta a velocidade de vibração vertical

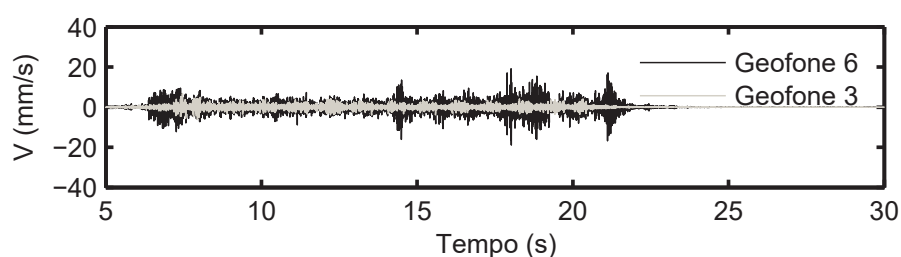
após a aplicação do filtro, pode concluir-se a respeito do material circulante, que as locomotivas são diferentes nas duas vias, o número de carruagens é similar e o material circulante na via com USP circula a uma velocidade ligeiramente superior. A respeito da velocidade de vibração vertical salientam-se as seguintes conclusões: no eixo de ambas as vias esta é similar, a três metros do eixo da via é evidente uma redução substancial em ambas as vias, tendencialmente superior na via com USP, a sete metros do eixo da via as velocidades aparentam ser residuais quando comparadas com as outras posições, mantendo-se a tendência identificada a três metros do eixo da via.



(a) Geofones no eixo da via



(b) Geofones a 3 m do eixo da via



(c) Geofones a 7 m do eixo da via

Figura 4.2: Velocidade de vibração vertical, geofones 1, 2 e 3 (via com USP), geofones 4, 5 e 6 (via sem USP)

Devido à complexidade inerente a este tipo de sinais, procede-se a uma análise em frequência, para identificar as frequências dominantes. O sinal também é analisado em bandas de um terço de oitava, para aferir o efeito das USP na redução de vibrações. Para a análise do sinal em bandas de um terço de oitava, calcula-se a média de amplitudes na banda (i), sendo (i) a frequência central da banda; a redução de amplitude é a diferença entre a via sem USP e a via com

USP; quando nas Figuras 4.3(b), 4.4(b) e 4.5(b) a redução é positiva, implica que as USP são eficientes, caso contrário existe uma amplificação da banda.

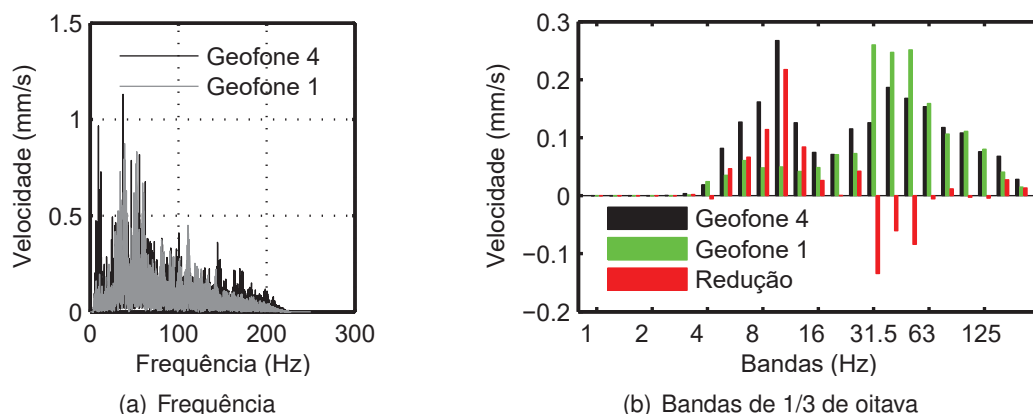


Figura 4.3: Resposta em frequência no eixo da via

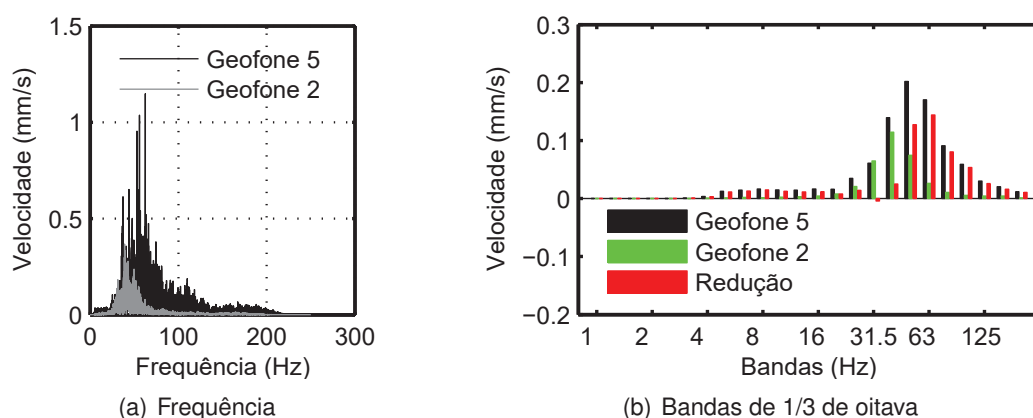


Figura 4.4: Resposta em frequência a 3 m do no eixo da via

Ao analisar o sinal no centro da via, como é possível visualizar na Figura 4.3 (a), as frequências dominantes encontram-se entre 25 a 65 Hz, correspondendo a comprimentos de onda entre 0,35 a 0,88 m, para uma velocidade de 80 km/h; estes comprimentos de onda estão relacionados com o espaçamento entre travessas 0,6 m, e possíveis irregularidades da roda e/ou do carril.

Importa salientar que na Figura 4.3 (b), e similares, as bandas encontram-se legendadas de 4 em 4, sendo evidente uma amplificação do sinal nas bandas 31,5, 40 e 50 Hz. Atendendo aos limites das bandas, pode concluir-se que o sinal é amplificado para comprimentos de onda entre 0,39 e 0,78 m, o que encaixa efetivamente na gama de frequências dominante do sinal identificada no parágrafo anterior.

Também é evidente, uma substancial redução, nas bandas inferiores a 16 Hz, e um efeito quase nulo em bandas superiores a 50 Hz.

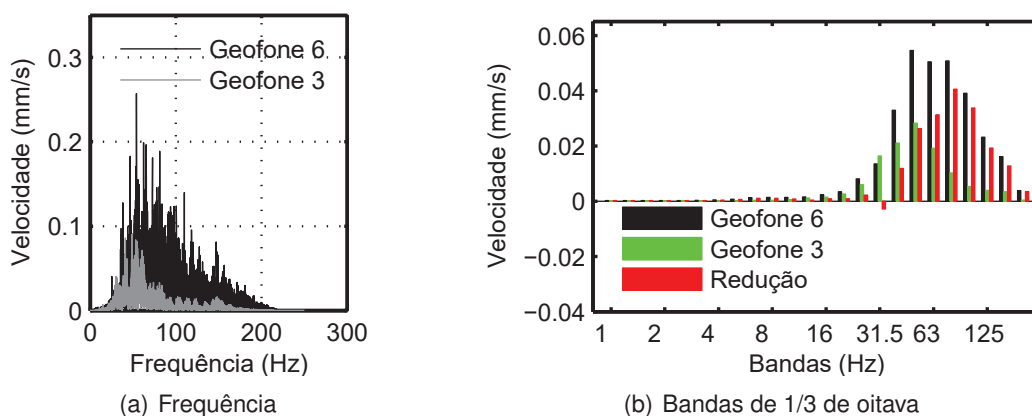


Figura 4.5: Resposta em frequência a 7 m do no eixo da via

A Figura 4.4 (a), corresponde ao sinal a três metro do eixo da via, sendo a gama dominante da via sem USP de 25 a 65 Hz, e da via com USP de 25 a 55 Hz. É perceptível uma redução de velocidade devido à influência das USP, essencialmente acima dos 55 Hz.

Em frequências acima de 150 Hz, comparando os sinais com os do eixo da via, é evidente uma redução substancial das amplitudes para ambas as soluções; isto deve-se essencialmente ao efeito da camada de balastro, pois estes comprimentos de onda estão na ordem de grandeza das partículas do mesmo. No caso da via com USP este efeito é ainda potenciado inicia-se a partir dos 75 Hz.

Na Figura 4.4 (b), identifica-se uma clara redução por efeito das USP em quase todas as bandas de frequência, sendo a exceção as bandas 31,5 e 40 Hz.

A respeito das Figuras 4.5 (a) e (b), importa salientar que a escala do eixo das ordenadas foi alterada devido à redução substancial das velocidades. As tendências identificadas na análise gráfica são análogas às referidas para a distância de três metros do eixo da via.

4.4 Modelos numéricos

Neste sub-capítulo é feita a descrição dos parâmetros utilizados nos modelos numéricos desenvolvidos no programa "Pegasus", para reproduzir numericamente o comportamento da via férrea descrito no Sub-capítulo 4.3.

Nos modelos desenvolvidos os carris foram divididos em elementos finitos de 0,2 m; as travessas tem 2,6 m de comprimento por 0,3 m de largura em bitola¹ europeia (1435 mm), na sua direção longitudinal foram divididas em 12 elementos

¹Distância entre carris medida na zona da cabeça do carril 14 mm abaixo da mesa de rolamento do carril.

finitos de barra, oito destes elementos na zona central da travessa (bitola) e dois em cada extremo.

Tendo como base alguns trabalhos desenvolvidos com o programa "Pegasus" foi considerado pelo autor que as malhas de elementos finitos, otimizadas nos trabalhos realizados por Varandas (2013a) e Correia (2015) e já utilizadas por Barreto (2016), encontram-se bastante otimizadas. Estas apresentam bons resultados, quer em deslocamentos, quer em tensões. Por este motivo o autor opta por não efetuar mais estudos neste sentido.

A Figura 4.6 (a), corresponde à malha dos elementos sólidos adotada nos troços inicial e final do modelo da via férrea. A malha apresentada na Figura 4.6 (b), é utilizada no troço central do modelo onde se pretende uma maior precisão numérica dos resultados.

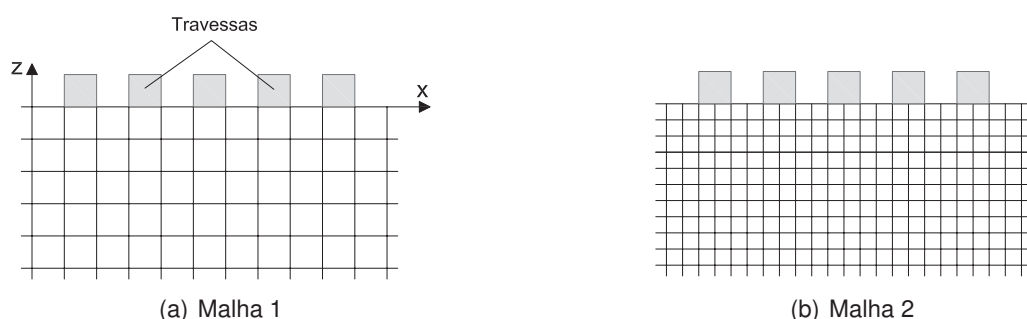


Figura 4.6: Malhas de elementos finitos, adaptado de Varandas (2013a)

Na Figura 4.7, estão representadas as dimensões geométricas comuns aos dois modelos desenvolvidos. Na Tabela 4.2, estão descritos os parâmetros relativos à super-estrutura da via e comuns aos dois modelos. Relativamente à Tabela 4.3, encontram-se os parâmetros da rigidez de contacto entre a super-estrutura e a sub-estrutura, sendo o modelo (1) a via sem USP e o modelo (2) a via com USP. Os parâmetros relativos à sub-estrutura da via descritos na Tabela 4.4, são comuns aos dois modelos desenvolvidos. A Figura 4.8, representa o modelo do material circulante adotado para simular as bogies de carruagens seguidas; os parâmetros relativos a este modelo encontram-se dispostos na Tabela 4.5.

Observando a Figura 4.7, é visível a substituição de uma espessura de um metro de solo por restrições nodais, compostas por conjuntos de mola e amortecedor no eixo z . Importa salientar que estas restrições também estão presentes nos eixos x e y , contudo omitiu-se por opção a sua representação esquemática, por uma questão de percetibilidade da imagem.

Esta substituição (no eixo z) tem o objetivo de diminuir os graus de liberdade do modelo e impedir o reflexo das ondas na fronteira inferior, culminando num menor tempo de cálculo devido à diminuição do número de nós e uma estabilização mais rápida do modelo.

O parâmetro de contacto $K_{usp,v}$, que simula a rigidez vertical entre a travessa e o

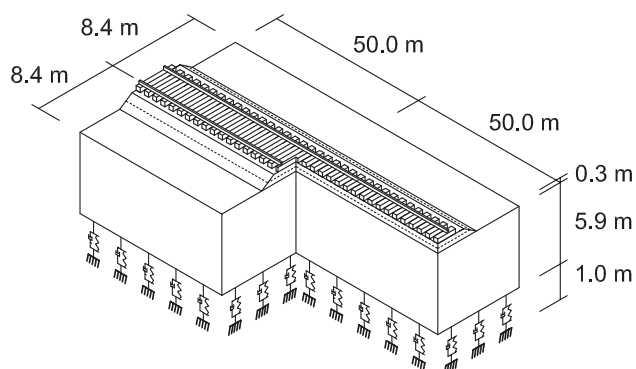


Figura 4.7: Dimensões do modelo numérico

Tabela 4.2: Parâmetros da super-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do carril 60E1		
Densidade [t/m ³]	ρ_{cr}	7,86
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{cr}	210
Área [m ²]	A_{cr}	$76,7 \times 10^{-4}$
Inércia vertical [m ⁴]	$I_{cr,v}$	$3038,3 \times 10^{-8}$
Inércia horizontal [m ⁴]	$I_{cr,h}$	$512,3 \times 10^{-8}$
Dados das palmilhas de carril e fixações		
Massa [kg]	m_p	5,00
Rigidez na direção x [kN/m]	$K_{x,p}$	$50,0 \times 10^3$
Rigidez na direção y [kN/m]	$K_{y,p}$	$50,0 \times 10^3$
Rigidez na direção z [kN/m]	$K_{z,p}$	400×10^3
Amortecimento na direção x [kN.s/m]	$C_{x,p}$	17
Amortecimento na direção y [kN.s/m]	$C_{y,p}$	17
Amortecimento na direção z [kN.s/m]	$C_{z,p}$	17
Dados da travessa		
Massa [kg]	m_{tr}	330
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{tr}	30,0

balastro da Tabela 4.3, foi calculado com a seguinte equação:

$$K_{usp,v} = K_{usp} \times b_{tr} \quad (4.1)$$

sendo:

$K_{usp,v}$ - rigidez vertical em [kN/m²]

K_{usp} - rigidez vertical da Tabela 4.1 convertida para [kN/m³]

b_{tr} - largura da travessa

Para calcular a rigidez da mola que liga os dois sistemas, nomeadamente a super-estrutura e a sub-estrutura, o programa multiplica o valor de $K_{usp,v}$ pelo comprimento de influência do nó dos elementos finitos da travessa, como foi explicado do Sub-capítulo 3.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de contacto entre a travessa e o balastro

Parâmetro	Notação	Modelo (1)	Modelo (2)
Dados da USP			
Rigidez vertical [kN/m ²]	$K_{usp,v}$	$6,25 \times 10^6$	$3,90 \times 10^4$
Rigidez horizontal [kN/m ²]	$K_{usp,h}$	$4,00 \times 10^5$	$1,30 \times 10^4$
Amortecimento vertical [kN.s/m/m]	$C_{usp,v}$	2,50	4,46
Amortecimento horizontal [kN.s/m/m]	$C_{usp,h}$	1,00	1,00

Tabela 4.4: Parâmetros da sub-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_b	1,80
Módulo de elasticidade [MPa]	E_b	130
Coefficiente de poisson	ν_b	0,20
Espessura da camada [m]	e_b	0,30
Dados do sub-balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_{sb}	1,90
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{sb}	100
Coefficiente de poisson	ν_{sb}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{sb}	0,30
Dados do solo de fundação		
Densidade[t/m ³]	ρ_{fd}	1,70
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{fd}	60,0
Coefficiente de poisson	ν_{fd}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{fd}	6,60

O modelo de material circulante adotado simula o eixo de rodados. Este modelo reproduz o efeito das massas não suspensas, o que permite ter em conta alguns efeitos dinâmicos. Este modelo tem a vantagem de ser necessário um número reduzido de parâmetros, comparativamente aos modelos mais complexos. Contudo, não simula com precisão a dinâmica do veículo.

Tabela 4.5: Parâmetros do material circulante

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do eixo		
Força [kN]	F_e	190,0
Massa [t]	M_e	2,200
Inercia de rotação em torno de x [t.m ²]	$I_{x,e}$	0,900
Raio da roda [m]	R_e	0,445

Na Tabela 4.5, o parâmetro massa do eixo M_e é utilizado para o cálculo da matriz de massa do veículo. Contudo numa análise estática do eixo, as reações produzidas por este são iguais à força aplicada no centro do mesmo F_e ; com isto pretende dizer-se que este parâmetro apenas entra no cálculo do sistema inercial do veículo.

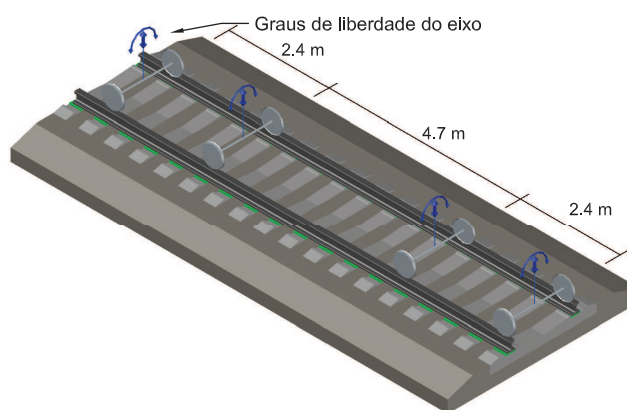
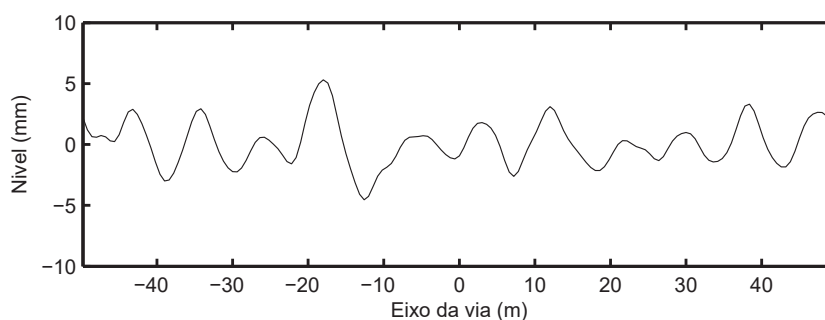


Figura 4.8: Esquema do material circulante

O gráfico apresentado na Figura 4.9, corresponde aos dados de nivelamento obtidos pelo equipamento EM-120, relativos à via onde se encontram instaladas as USP, entre o PK 253+200 e o PK 253+300. Os dados do nivelamento foram alvo de tratamento para apenas conterem comprimentos de onda superiores a 3,0 m e alterar a sua discretização inicial para o espaçamento entre as travessas.

Os dados das irregularidades Figura 4.10, também foram obtidos pelo equipamento EM-120, contudo correspondem a comprimentos de onda inferiores a 3,0 m. O seu tratamento consistiu em cortar os comprimentos de onda superiores e aplicar uma função de interpolação. Assim passou-se de uma discretização de 0,25 m para 0,005 m e foi possível suavizar o efeito "tipo dente" que os mesmos apresentavam. Importa salientar, que a informação relativa às irregularidades é pouco fidedigna pois este tipo de informação deve ser obtido com equipamento específico com maior precisão (equipamento que mede desgaste ondulatório), seriam necessários mais dados para a sua correta caracterização.

Figura 4.9: Nivelamento da via Mashhad-Tehran ($\lambda > 3,0$ m)

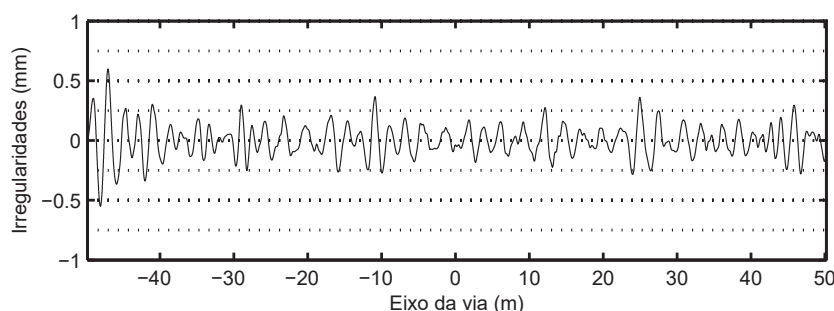


Figura 4.10: Irregularidades da via Mashhad-Tehran ($\lambda < 3,0$ m)

4.5 Validação dos modelos numéricos

Nesta fase do estudo pretende-se validar os modelos numéricos descritos no Sub-capítulo 4.4. Para isto serão comparadas as velocidades obtidas com os geofones e analisadas no Sub-capítulo 4.2, com os resultados obtidos através dos modelos numéricos.

O processo de calibração dos modelos consistiu em encontrar os parâmetros da fundação (comuns a ambos os modelos) que aproximassem as velocidades medidas no balastro das velocidades obtidas pelos modelos numéricos.

Como foi explicado no Sub-capítulo 4.2, existiu a necessidade de filtrar os dados experimentais devido à gama de trabalho dos geofones, em que foi utilizado um filtro (passa-alto) de 4,5 Hz. O nivelamento foi introduzido no nível das travessas, como foi explicado anteriormente. Considerando uma velocidade de 80 Km/h, um comprimento de onda de 1,2 m (correspondente à distância entre três travessas) corresponde a uma frequência de 18,5 Hz. Ou seja, 18,5 Hz é a máxima frequência induzida no modelo numérico, pelo que é necessário cortar o sinal a acima deste valor.

Em suma, para que os dados experimentais e numéricos possam ser comparáveis, serão aplicados filtros: (passa-alto) de 4,5 Hz e (passa-baixo) de 18,5 Hz.

A Figura 4.11, apresenta os deslocamentos verticais do balastro, no eixo da via, dos ensaios experimentais e modelação numérica após aplicar o processo de filtragem anteriormente explicado, e uma integração no tempo aos registos das velocidades medidos pelos geofones. Pode observar-se que para a via sem USP, Figura 4.11 (a), a aproximação é razoável. Contudo, na via com USP, Figura 4.11 (b), esta aproximação não é tão boa.

Na via com USP o modelo numérico apresenta uma flexibilidade superior à real medida. Para isto pode ter contribuído algum défice de informação do ensaio experimental. Este défice de informação deve-se à utilização de geofones com uma frequência natural elevada 4,5 Hz. Para a velocidade de circulação do veículo de 80 Km/h o sistema de instrumentação utilizado só permite assim gravar

comprimentos de onda inferiores de 4,9 m, o que é algo limitado.

A instalação de USP torna o sistema da via mais flexível, isto leva a que as cargas sejam distribuídas por mais travessas. Assim espera-se que a bacia de deslocamentos verticais provocada por bogies seguidas seja maior, e com isto a influência das baixas frequências torna-se mais importante. A utilização de geofones com um frequência natural mais baixa teria sido uma mais valia para a calibração adequada deste modelo numérico.

Nos modelos numéricos desenvolvidos, os parâmetros geotécnicos foram considerados iguais para as duas vias. Contudo, as vias, das linhas em via dupla, muitas vezes são construídas com anos de intervalo, isto pode levar a adoção de técnicas construtivas diferentes e/ou utilização de materiais diferentes, possivelmente invalidando a simplificação adotada.

A Figura 4.12, apresenta a velocidade vertical medida no balastro, no eixo da via, do ensaio experimental e da modelação numérica, após a aplicação do processo de filtragem em ambos. Comparando o ensaio experimental com a modelação numérica na Figura 4.12 (a), referente à via sem USP, conclui-se que o modelo numérico subestima ligeiramente as velocidades medidas no ensaio experimental. Pelo contrario, na Figura 4.12 (b), as velocidades são ligeiramente sobrestimadas.

Salienta-se, no entanto, que tanto o ensaio experimental como a modelação numérica evidenciam claramente a redução da velocidade de vibração do balastro com a introdução de USPs no sistema da via.

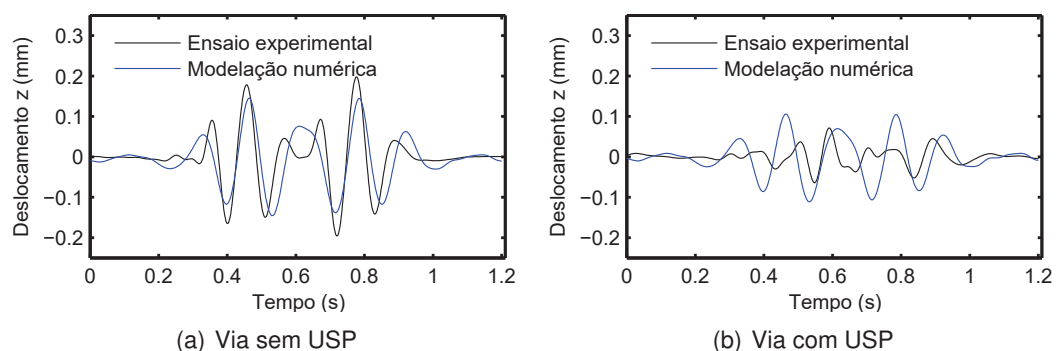


Figura 4.11: Deslocamento vertical do balastro no eixo longitudinal da via

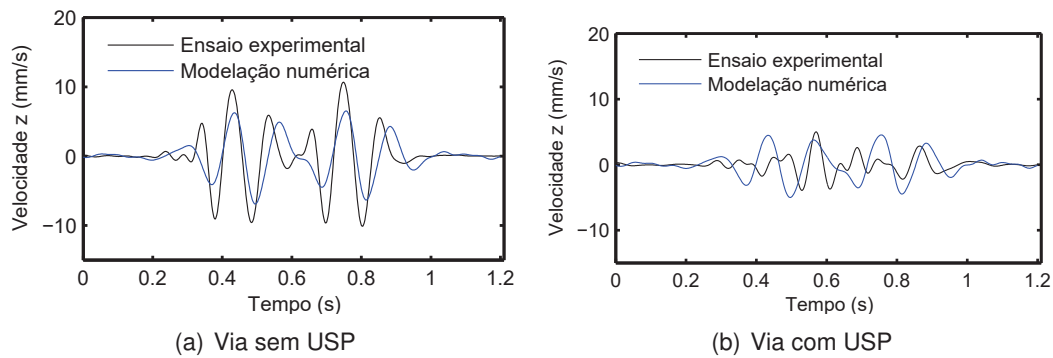


Figura 4.12: Velocidade vertical do balastro no eixo longitudinal da via

4.6 Análise dos modelos numéricos

Nesta fase do estudo pretende-se analisar os dados dos modelos numéricos relativamente aos deslocamentos ao nível do carril e das travessa, e às forças travessa-balastro e roda-carril, uma vez que estes dados não foram medidos no estudo efetuado por (Jabbar et al., 2015).

Na Figura 4.13, apresentam-se os máximos e mínimos deslocamentos verticais do carril obtidos nos modelos numéricos em análise. O deslocamento máximo de ambos os modelos não apresenta diferenças apreciáveis. Contudo, o deslocamento mínimo da via com USP é superior em 40%, o que confirma a tendência apresentada nas modelações numéricas efetuadas em (Paixão, 2014), para zonas de transição com e sem USPs instaladas.

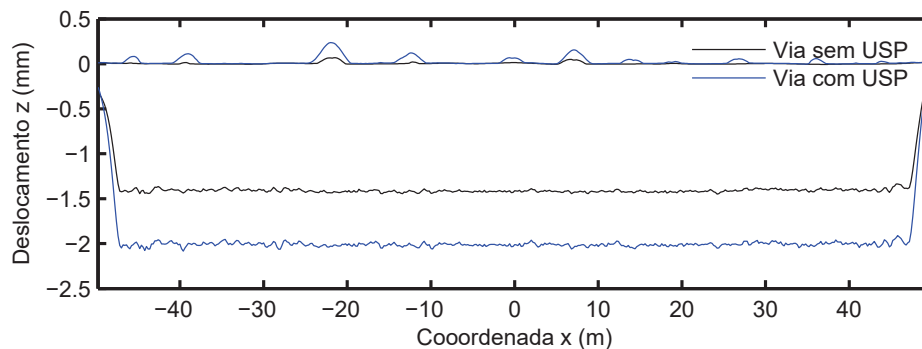


Figura 4.13: Deslocamentos verticais máximos e mínimos do carril nos modelos numéricos

Para aferir o comportamento das travessas foi selecionado o nó do modelo numérico de elementos finitos na posição central na travessa. Esta escolha teve como base o nó que apresentava maior amplitude de deslocamentos, isto é, comparando o nó no centro da travessa os outros nós da mesma travessa este apresenta deslocamentos ligeiramente superiores, inclusive superiores aos nós que se encontram sob os carris. Isto é válido para ambos os modelos numéricos, nomeadamente sem e com USP instaladas.

As Figuras 4.14 (a) e (b), representam o deslocamento e a velocidade do nó central da travessa, comparando os resultados obtidos com a solução com USP e sem USP. Como se pode observar nas Figuras, a introdução de USP na via provoca um aumento de deslocamentos máximos descendentes e da amplitude da velocidade em 43% e 82%, respetivamente. Este comportamento deve-se acima de tudo ao aumento da flexibilidade da via.

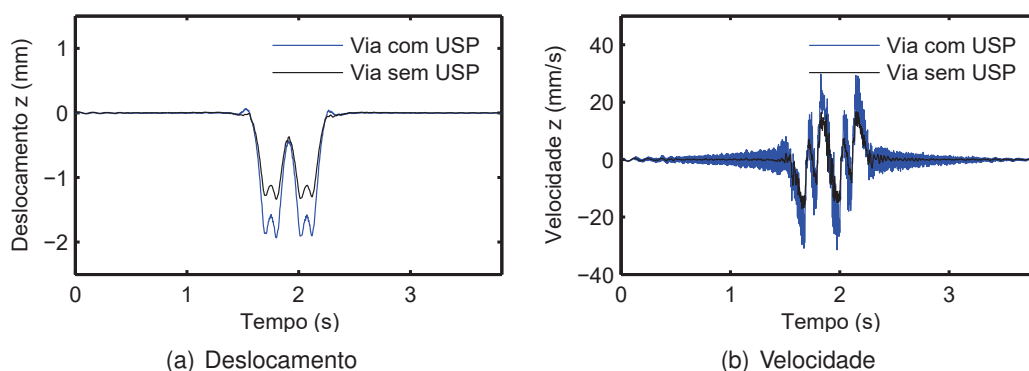


Figura 4.14: Comportamento da travessa em deslocamento e velocidade nos modelos numéricos

Na Figura 4.15, pode ser visto o comportamento do nó central da travessa relativamente às acelerações que este apresenta. Apesar do sinal se apresentar "como uma mancha", identifica-se um aumento significativo da aceleração do nó da travessa com USP comparativamente ao sem USP. Esta análise verifica com as conclusões de (Paixão, 2014), que identifica que as USP ao aumentarem a flexibilidade da via também aumentam substancialmente as acelerações nas travessas.

Como apenas foi possível analisar qualitativamente este sinal, explorou-se o conteúdo do mesmo em frequências como pode ser visto na Figura 4.15 (b). Através da análise desta Figura foi possível concluir que existe uma amplificação do sinal no intervalo de frequências 100 a 125 Hz, para o nó da travessa com USP.

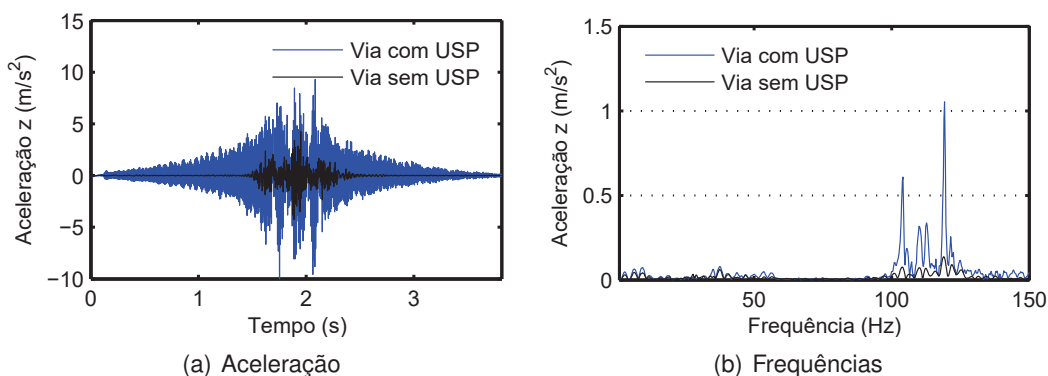


Figura 4.15: Comportamento da travessa em acelerações nos modelos numéricos

As Figuras 4.16 (a) e (b), apresentam os deslocamentos do carril numa zona localizada à frente do veículo em passos de tempo seguidos. Observando o deslocamento da onda é possível calcular que a primeira crista se desloca a uma velocidade de 300 m/s e a segunda crista a 400 m/s. Nas Figuras 4.16 (a) e (b), identifica-se um comprimento de onda de 3,2 m e 3 m respetivamente. Importa salientar que esta dispersão de valores se deve em parte à dificuldade de identificar com precisão as cristas da onda, o que se deve às velocidades envolvidas e à discretização dos elementos finitos que representam o carril (0,2 m). Os comprimentos de onda associados às velocidades identificadas correspondem a um intervalo de frequências de 93 a 133 Hz. Intervalo este identificado nas acelerações da travessa na Figura 4.15 (b). Contudo, pode concluir-se pela observação da Figura 4.16, que as amplitudes do deslocamento do carril associadas são muito baixas (na ordem das centésimas de milímetro), embora provoquem acelerações elevadas na travessa devido à elevada velocidade a que estas ondas se deslocam.

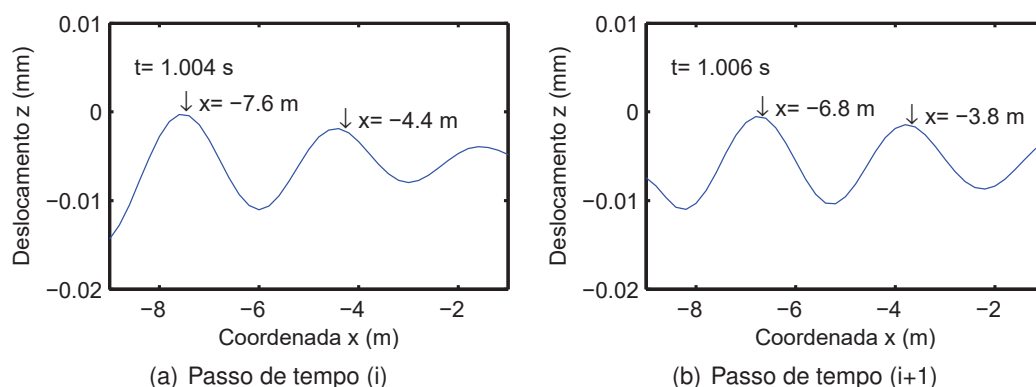


Figura 4.16: Deslocamentos do carril medidos antes da passagem do veículo que se encontra em movimento

Atendendo aos factos discutidos anteriormente são apresentadas as Figuras 4.17 (a) e (b), que correspondem às velocidades e acelerações da travessa em que foi aplicado um filtro (passa-baixo) de 44 Hz. Isso corresponde a eliminar comprimentos de onda inferiores a 0,5 m, para uma velocidade de circulação do veículo de 80 Km/h. A escolha desta frequência de corte teve em conta a discretização dos dados de nivelamento obtidos pela EM-120 (0,25 m). Observando a Figura 4.17 (b), continua a ser observado um ligeiro aumento das acelerações com a introdução das USPs. No entanto, estas acelerações encontram-se bastante longe dos 10 m/s², valor a partir do qual a camada de balastro pode tornar-se instável, caso estas acelerações lhe fossem transmitidas na íntegra.

É ainda possível comprovar que as velocidades acima estimadas (entre 300 e 400 m/s) correspondem à propagação de ondas numa viga semi-infinita elasticamente apoiada. Esta velocidade pode ser obtida pela Equação (4.2), em que K corresponde à rigidez de apoio da viga (neste caso considerou-se a rigidez equivalente da USP por metro linear de via), EI corresponde à rigidez de flexão

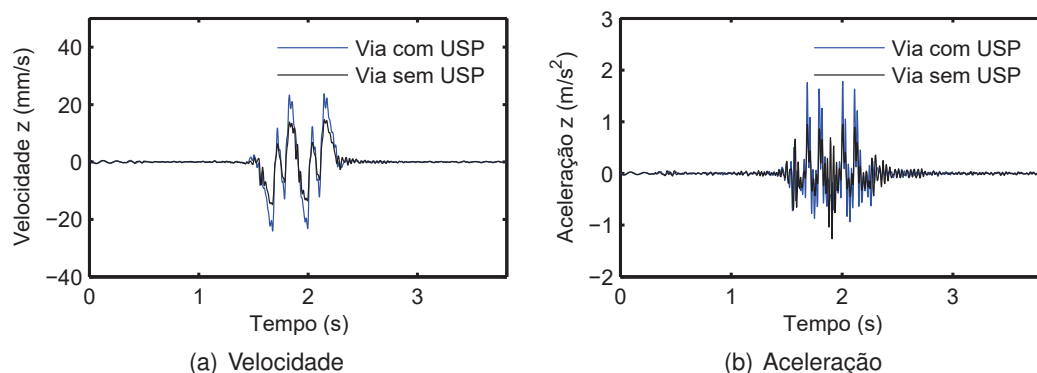


Figura 4.17: Comportamento da travessa nos modelos numéricos após o processo de filtragem

dos carris, e m corresponde à massa dos carris e travessas distribuída por metro linear de via.

$$v_{cr.} = \sqrt[4]{\frac{4KEI}{m^2}} \quad v_{cr} = 372m/s^2 \quad (4.2)$$

Um dos aspetos apurados na pesquisa bibliográfica, apresentada no Sub-capítulo 2.2.5, relativamente à instalação de USP consiste nestas promoverem uma melhor distribuição de forças da via sobre o balastro. Para comparar os dois modelos numéricos relativamente a este aspeto será seguida a seguinte metodologia: em primeiro lugar será estudada a distribuição de forças na via sem cargas móveis, e posteriormente estudado o mesmo efeito com a via sujeita às ações impostas pelo material circulante.

No primeiro caso as forças em causa são devidas ao peso próprio da via, logo estão presentes mesmo quando esta não está sujeita as ações impostas pelo material circulante. Caso não existissem desnivelamentos seria de esperar que estas forças fossem aproximadamente constantes ao longo da direção longitudinal da via. Contudo, estas forças são distribuídas de forma inconstante devido à elevada inércia de flexão dos carris associada a um nivelamento irregular que pode ser visto na Figura 4.9.

A Figura 4.18, compara os modelos numéricos da via com e sem USP. Pode observar-se que a via com USPs apresenta uma distribuição de forças mais eficiente, onde a máxima força de compressão foi reduzida em 28 %. Isto verifica com as conclusões apresentadas por alguns autores e discutidas no Sub-capítulo 2.2.5, que defendem que a utilização de USP melhora efetivamente a distribuição de forças sobre o balastro.

No segundo caso foram analisadas máximas forças de compressão travessas-balastro quando o veículo circula sobre a via. Importa salientar que nesta fase foram subtraídas as forças apresentadas na Figura 4.18. O objetivo

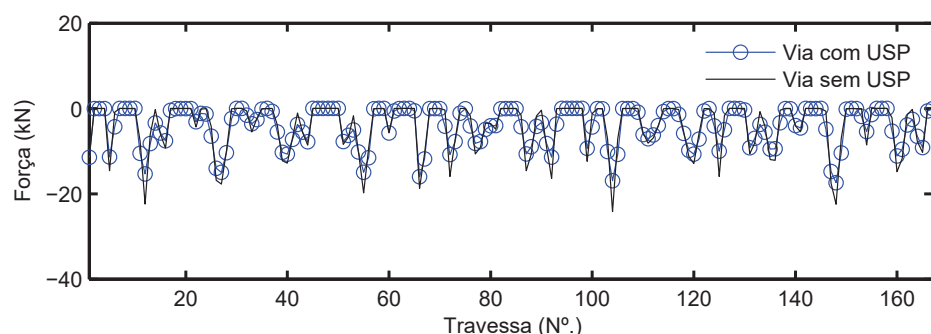


Figura 4.18: Estado inicial das forças de contacto travessa-balastro nos modelos numéricos

deste procedimento é aferir a evolução das forças de contacto travessa-balastro sem a influência do estado inicial de forças da via.

Analogamente ao considerado anteriormente, caso a via não apresentasse defeitos de nivelamento, e atendendo ao facto de não serem consideradas variações dos parâmetros do sistema balastro-fundação em ambos os modelos, seria expectável que a força mínima fosse constante ao longo da direcção longitudinal da via. Como existem irregularidades, estas fazem com que sejam mobilizadas forças de inércia no sistema do veículo que por sua vez serão transmitidas à via pelo que se espera uma variação das forças de contacto travessa-balastro. Na Figura 4.19 podem ser comparados os resultados obtidos com os dois modelos numéricos, nomeadamente sem e com USP. No modelo com USP a força foi reduzida em média em 32%.

Na Tabela 4.6, encontra-se o tratamento estatístico das forças mínimas obtidas nos dois modelos numéricos. Desprezam-se os resultados obtidos nos extremos do modelo, junto as fronteiras. Observando os valores do desvio padrão da Tabela 4.6, é possível concluir que a instalação de USP para além de reduzir a força de contacto travessa-balastro, também permite uma menor dispersão dos valores desta força. Atendendo à forte dependência entre o assentamento da camada de balastro e a força imposta pelas travessas a este, pode afirmar-se que uma menor magnitude e variabilidade desta força contribuirá ativamente para a manutenção do nivelamento da via a longo prazo.

Tabela 4.6: Tratamento estatístico das forças de contacto travessa-balastro induzidas pelo veículo

Modelo	Média [kN]	Desvio padrão [kN]
Sem USP	-86,08	1,26
Com USP	-65,23	0,97

Em seguida é apresentado um estudo das forças de interação roda-carril para aferir a influência da utilização de USPs neste parâmetro. Na Figura 4.20, estão representadas as forças de interação roda-carril. Estas forças correspondem a uma roda do primeiro eixo do veículo. Importa salientar que foram desprezados

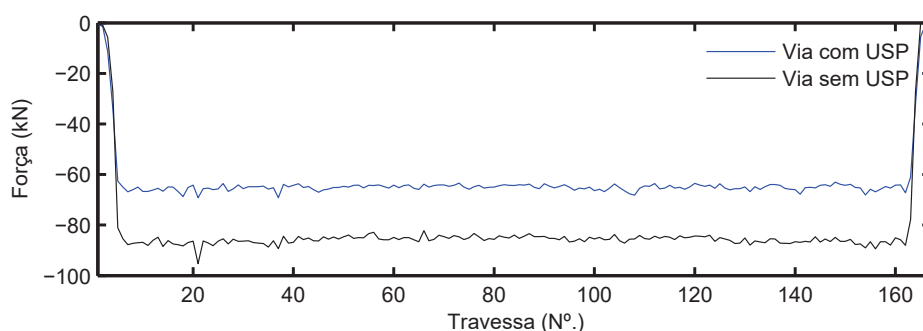


Figura 4.19: Forças de contacto travessa-balastro induzidas pelo veículo nos modelos numéricos

os dados relativamente ao arranque do veículo, uma vez que o arranque é instantâneo, isto é o veículo passa de parado imediatamente para a velocidade de circulação de 80 Km/h. Observando o gráfico da Figura 4.20, não são evidentes diferenças apreciáveis entre os dois modelos. Analogamente ao procedimento anteriormente seguido efetuou-se o tratamento estatístico dos dados que pode ser visto na Tabela 4.7. A força média corresponde a metade da carga do eixo como era esperado, e a via com USP instaladas apresenta um desvio padrão ligeiramente superior, contudo este aumento é pouco significativo.

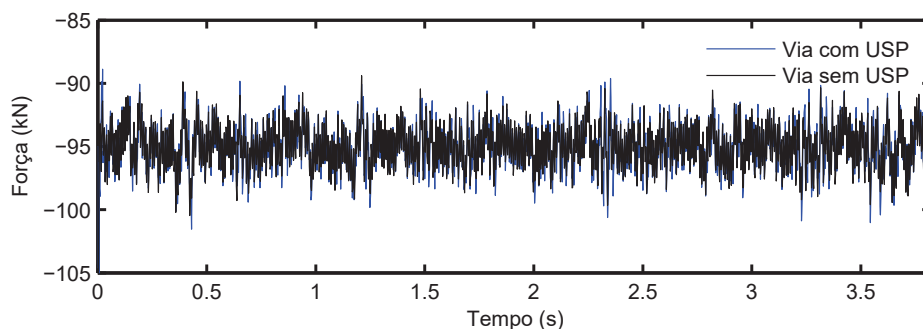


Figura 4.20: Forças de interação roda-carril nos modelos numéricos

Tabela 4.7: Tratamento estatístico das forças de interação roda-carril dos modelos numéricos

Modelo	Média [kN]	Desvio padrão [kN]
Sem USP	-95,06	1,56
Com USP	-95,05	1,64

Para esclarecer o efeito aparentemente inocuo das USPs nas forças de interação roda-carril, explorou-se o seu conteúdo em frequência como pode ser visto na Figura 4.21. Apesar da via em que estão instaladas USPs evidenciar maiores amplitudes entre os 30 e 50 Hz, não é possível aferir nenhum efeito positivo ou negativo relativamente à utilização de USPs nos modelos analisados.

Este pormenor importa ser convenientemente estudado, pois no levantamento

bibliográfico foi evidenciado que as USPs promovem a redução da rigidez de contacto entre a roda e o carril, contudo aparentemente para esta situação em particular isto não é evidente.

Uma das causas possíveis para que este efeito seja menos aparente, nestes modelos numéricos em particular é o facto do módulo de elasticidade da fundação ser de 60 MPa. Como a fundação é relativamente flexível a utilização de USP, não é, ou não evidencia ser, benéfica para suavizar a rigidez de contacto roda-carril, o que por sua vez faz com que não se identifiquem menores amplitudes nas forças de interação roda-carril.

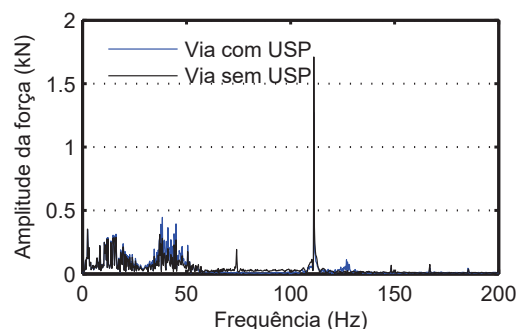


Figura 4.21: Análise em frequência das forças de interação roda-carril

O conteúdo em frequência das forças de interação roda-carril apresenta uma amplitude elevada para a frequência de 111 Hz. Foi adotado um procedimento análogo ao utilizado no tratamento de dados das travessas, aplicando um filtro (passa-baixo) de 44 Hz. A Figura 4.22, apresenta os dados das forças de interação roda-carril após a aplicação do filtro. Analisando a Figura, é claro uma redução da dispersão das forças em relação ao seu valor médio. Contudo, continua a não ser evidenciado nenhum efeito positivo relativamente à introdução de USPs na estrutura da via.

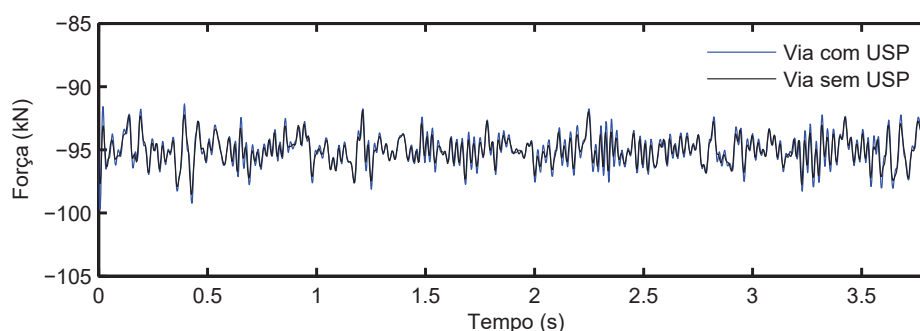


Figura 4.22: Forças de interação roda-carril nos modelos numéricos após o processo de filtragem

Capítulo 5

Estudo paramétrico

5.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se estudar a influência da rigidez vertical das palmilhas de carril e das palmilhas de travessa (USP) no deslocamento vertical do carril. A metodologia seguida consiste na realização de um estudo paramétrico, em que serão testadas várias combinações de palmilhas, para diferentes módulos de elasticidade de fundação. A simulação numérica consiste em aplicar cargas verticais estáticas sobre os carris, para simular um eixo do material circulante e estimar o deslocamento vertical do carril. Estas cargas são aplicadas nos carris na zona sobre a travessa.

Este estudo pretende dar resposta essencialmente aos seguintes temas: em primeiro lugar à dificuldade de parametrizar devidamente de modelos numéricos representativos de casos concretos com USP; em segundo à dificuldade de obter a combinação ótima entre as palmilhas de carril e de travessa ao longo de toda a extensão da via.

Relativamente ao primeiro tema, quando são instrumentadas vias férreas para aferir o seu comportamento, é relativamente fácil medir o deslocamento vertical do carril sem criar grandes constrangimentos operacionais. No entanto, os parâmetros que caracterizam a fundação, como é o caso do módulo de elasticidade, são bastante mais difíceis de obter. Com os dados obtidos neste estudo será possível extrapolar o módulo de elasticidade do solo com o deslocamento vertical medido no carril. O autor acredita que este estudo poderá contribuir para que futuros investigadores que pretendam parametrizar os seus modelos numéricos, sem uma extensa bateria de ensaios experimentais que inclua a caracterização geotécnica, possam fazer uma primeira calibração dos modelos de forma mais expedita.

Relativamente ao segundo tema pretende-se reduzir a dificuldade de obter a combinação ótima entre as palmilhas de carril e de travessa ao longo de toda

a extensão da via. Este estudo disponibiliza dados para pré-dimensionar esta combinação em vias que apresentem condições similares às aqui estudadas.

Importa salientar algumas limitações deste estudo, como a impossibilidade de variar todos os parâmetros relativos à estrutura da via. Devido a esta impossibilidade foi assumido um perfil típico de uma via balastrada moderna como pode ser visto na Figura 5.1 , com a inclusão de USPs.

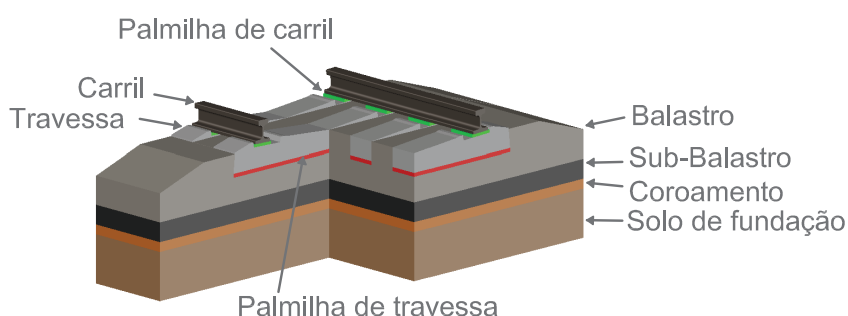


Figura 5.1: Esquema tipo da via balastrada adotada no estudo paramétrico

Na construção ou renovação de vias férreas é possível obter o parâmetro E_{v2} por alguns métodos identificados na Secção 2.2.9, nos modelos numéricos este parâmetro pode ser utilizado com representativo do módulo de elasticidade da fundação.

A partir deste estudo, com o conhecimento prévio do módulo de elasticidade da fundação ao longo da via, torna-se possível estimar diretamente o deslocamento estático do carril para um eixo do material circulante com 250 kN, para uma determinada combinação de RP e USP. Como o modelo adotado é elástico linear também é fácil extrapolar o correspondente deslocamento para diferentes cargas de eixo.

Uma das ideias que fundamenta a realização deste estudo, consiste em considerar que se o deslocamento estático do carril é igual ao longo da via, é expectável que se obtenha um bom comportamento dinâmico. Esta abordagem é bastante simplista no que se refere ao comportamento dinâmico, pois este depende de inúmeros fatores, como por exemplo a existência ou não de defeitos geométricos de nível e/ou de irregularidades no carril, e da relação entre a velocidade de circulação do comboio e a velocidade de propagação das ondas no meio atravessado.

Contudo, seguindo esta abordagem com as devidas restrições, é possível de uma forma expedita pré-dimensionar a combinação adequada entre as palmilhas de carril e USP.

5.2 Otimização do modelo

Para efetuar o estudo paramétrico serão necessários alguns procedimentos preliminares, entre os quais otimizar a geometria do modelo tridimensional e definir a discretização da malha de elementos finitos. Estes procedimentos requerem sempre um compromisso entre o tempo de cálculo e a fiabilidade dos resultados obtidos, isto é, os resultados obtidos não devem depender nem das dimensões do modelo nem da discretização da malha de elementos finitos.

As malhas de elementos finitos adotadas são as apresentadas na Secção 4.4. Nestes modelos foram consideradas travessa tipo monobloco de 2,6 m de comprimento por 0,3 m de largura em bitola ibérica (1668 mm).

Embora tenham sido realizados alguns estudos em Barreto (2016) com intuito de otimizar a geometria do modelo, estes foram focados essencialmente no deslocamento horizontal. Para a elaboração do estudo apresentado neste Capítulo realizaram-se algumas centenas de análises. Nesse sentido, considerou-se pertinente a realização de um estudo de otimização da geometria modelo. Este estudo justifica-se, tanto pelo número de horas de cálculo computacional envolvidas, quer para que futuros utilizadores destes dados possam ter a noção do erro associado à geometria de modelo adotada.

O procedimento adotado de otimização do modelo consistiu em construir uma geometria inicial de grandes dimensões, que irá servir de referência para calcular a diferença associado às outras geometrias estudadas. O procedimento seguinte consiste em reduzir as dimensões do modelo, e perceber a sua influência no parâmetro que se pretende avaliar. Importa salientar que nestes modelos foi considerada uma fundação com um módulo de elasticidade de 80 MPa.

Na Tabela 5.1, encontram-se os parâmetros relativos à geometria dos vários modelos estudados no intuito de otimizar o modelo final. Sobre os modelos apresentados na Tabela 5.1, importa explicar que a profundidade total do modelo é a soma da profundidades de elementos finitos (penúltima coluna da tabela), com a profundidade representada pelas molas (última coluna da tabela). Relativamente à segunda coluna da tabela, t_i corresponde ao número de travessas no troço inicial, t_c no troço central, t_f no troço final.

O primeiro procedimento de otimização consistiu em reduzir o numero de travessas, o que corresponde à redução do comprimento do modelo, direção x (Modelos 1 a 5). O procedimento seguinte consistiu em estudar o efeito da redução da largura do modelo, direção y (Modelos 6, 7 e 8). O terceiro procedimento foi estudar se a distância a que se encontra o estrato rígido influencia os resultados, para isso reduziu-se progressivamente a profundidade do modelo, direção z (Modelos 9 a 12). O quarto e ultimo procedimento consistiu em estudar a possibilidade aumentar altura da camada de fundação substituída por molas e amortecedores (Modelos 13 a 15).

A Figura 5.2, compara os resultados obtidos com os modelos 1 a 15 em termos de

Tabela 5.1: Otimização geométrica do modelo

Modelo	Travessas [<i>t_i t_c t_f</i>]	Largura [m]	Profundidade de elementos finitos [m]	Profundidade de molas [m]
1	[20 21 20]	15,8	8,9	1
2	[17 17 17]	15,8	8,9	1
3	[13 15 13]	15,8	8,9	1
4	[10 11 10]	15,8	8,9	1
5	[07 07 07]	15,8	8,9	1
6	[10 11 10]	11,8	8,9	1
7	[10 11 10]	09,8	8,9	1
8	[10 11 10]	07,8	8,9	1
9	[10 11 10]	15,8	7,1	1
10	[10 11 10]	15,8	5,1	1
11	[10 11 10]	15,8	3,1	1
12	[10 11 10]	15,8	0,9	1
13	[10 11 10]	15,8	8,1	2
14	[10 11 10]	15,8	6,1	4
15	[10 11 10]	15,8	4,1	6

deslocamento vertical do carril. Observando os gráficos da Figura 5.2, conclui-se que as alterações de geometria são relevantes na maioria dos casos. A Figura 5.2 (a), mostra que a redução do número de travessa apresenta influência ligeira nos resultados, ao passo que na Figura 5.2 (b), a redução da largura do modelo torna-o mais flexível na direção vertical e apresenta uma influência bastante superior nos resultados. A Figura 5.2 (c), mostra que a redução da profundidade do estrato rígido torna o modelo mais rígido na direção vertical, e apresenta uma influência relevante nos resultados, ao passo que a Figura 5.2 (d), mostra que a substituir uma maior espessura de solo por restrições nodais, apresenta pouca influência nos resultados.

Para sintetizar este estudo preliminar e evidenciar as diferenças entre os diversos modelos, optou-se por comparar o resultados do mesmo em percentagem de diferença. Esta percentagem tem como referência o primeiro modelo que corresponde ao modelo de maiores dimensões, e o seu cálculo foi efetuado com a Equação (5.1).

$$diff(i) = \left| \left(1 - \frac{mod(i)}{mod(r)} \right) \right| \times 100 \quad (5.1)$$

Em que: $diff(i)$ corresponde à diferença do modelo (i) em relação ao modelo de referência em percentagem, $mod(i)$ representa o parâmetro do modelo (i) do qual se pretende saber a diferença e $mod(r)$ corresponde ao parâmetro do modelo de referência.

Observando a Figura 5.3, que mostra a diferença afeta aos modelos analisados conclui-se pela observação das primeiras cinco colunas que a redução do comprimento do modelo não apresentam uma diferença significativa. Posto isto,

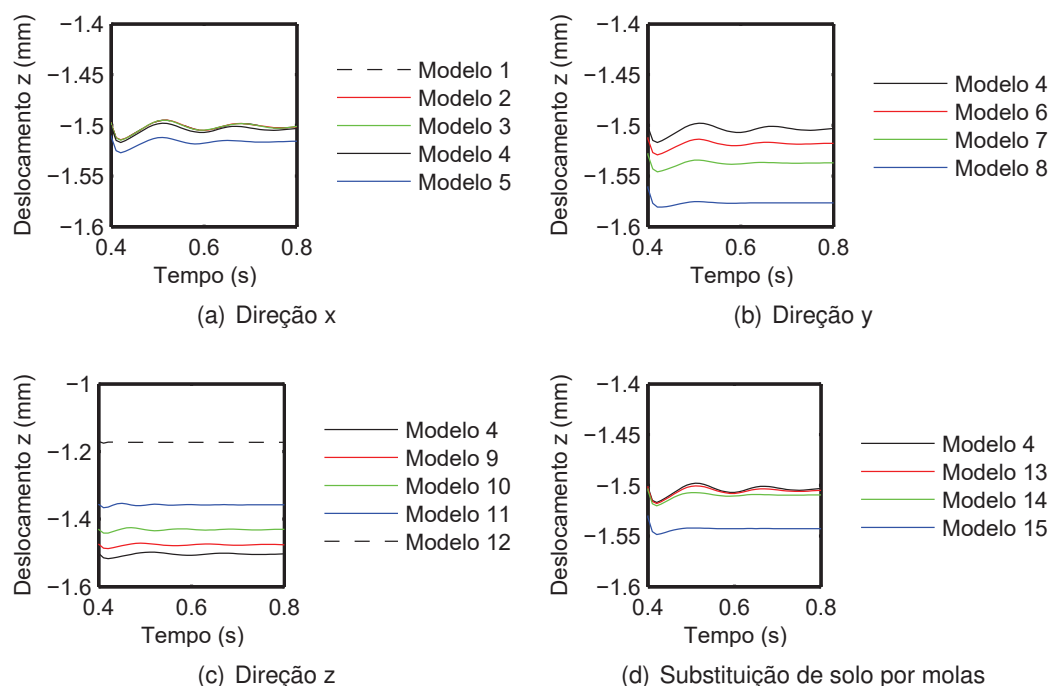


Figura 5.2: Otimização da geometria do modelo

selecionou-se o quarto modelo para as próximas fases de testes. Analisando as colunas seis a doze da Figura 5.3, correspondentes aos respectivos modelos, conclui-se estes apresentam uma diferença significativa como já tinha sido abordado na análise da Figura 5.2. Por fim, relativamente à ultima abordagem optou-se pelo modelo 14 da Tabela 5.1, correspondendo a respetiva coluna da Figura 5.3. Este apresenta um bom compromisso entre o tempo de cálculo e fiabilidade pretendida dos resultados.

Assim, em conclusão, os modelos seguidamente desenvolvidos no estudo paramétrico terão 31 travessas, uma largura de 15,8 m, uma profundidade total de 10,1 m, da qual 6,1 m são representados com elementos finitos sólidos, e 4 m são representados por restrições nodais.

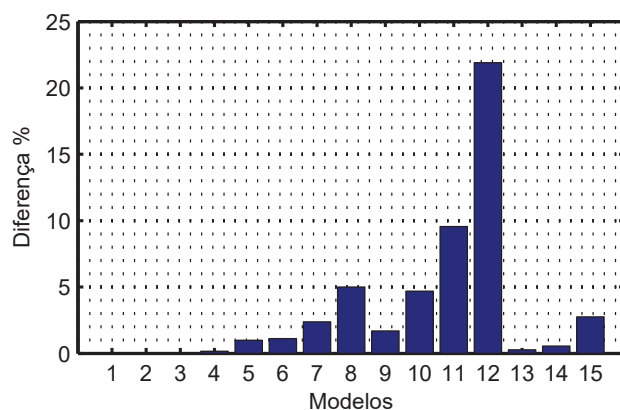


Figura 5.3: Diferença da otimização da geometria dos modelos

5.3 Dados que definem o modelo

Os dados necessários à completa definição do modelo são essencialmente os dados relativos à geometria, otimizados no Sub-capítulo 5.2, os dados que caracterizam as propriedades dos materiais, e os dados que caracterizam as ações impostas à estrutura da via.

Na Figura 5.4, pode ser observada a representação esquemática devidamente cotada do modelo adotado que será alvo do estudo paramétrico.

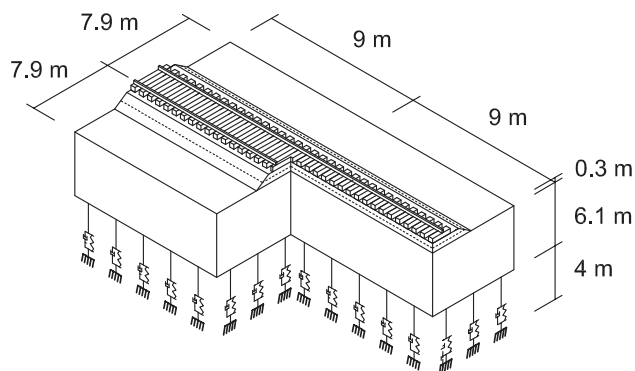


Figura 5.4: Dimensões do modelo otimizado para o estudo paramétrico

Quanto aos dados que caracterizam as propriedades dos materiais, alguns serão mantidos constantes e serão apresentados na Secção 5.3.1, e outros serão as variáveis do estudo paramétrico e serão apresentados em Secção 5.3.2.

5.3.1 Constantes do estudo paramétrico

Nesta secção são apresentados os dados que serão mantidos constantes em todos os modelos do estudo paramétrico.

Os parâmetros da super-estrutura da via são exemplo disso, estando apresentados na Tabela 5.2. Importa salientar que os parâmetros relativos ao amortecimento das palmilhas de carril foram omitidos nesta tabela uma vez que não são relevantes no cálculo estático.

Tabela 5.2: Parâmetros da super-estrutura do estudo paramétrico

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do carril 60E1		
Densidade [t/m ³]	ρ_{cr}	7,86
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{cr}	210
Área [m ²]	A_{cr}	$76,7 \times 10^{-4}$
Inércia vertical [m ⁴]	$I_{cr,v}$	$3038,3 \times 10^{-8}$
Inércia horizontal [m ⁴]	$I_{cr,h}$	$512,3 \times 10^{-8}$
Dados das palmilhas de carril e fixações		
Massa [Kg]	m_p	5,0
Rigidez na direção x [kN/m]	$K_{x,p}$	50×10^3
Rigidez na direção y [kN/m]	$K_{y,p}$	50×10^3
Rigidez na direção z [kN/m]	$K_{z,p}$	—
Dados da travessa		
Massa [kg]	m_{tr}	330
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{tr}	30,0

Relativamente aos parâmetros de contacto travessa-balastro dispostos na Tabela 5.3, a rigidez vertical será uma variável no estudo paramétrico, contudo a rigidez horizontal será mantida constante. Analogamente à tabela anterior também foram omitidos os parâmetros de amortecimento devido ao seu carácter irrelevante no cálculo estático.

Tabela 5.3: Parâmetros de contacto travessa-balastro constantes no estudo paramétrico

Parâmetro	Notação	Valor
Dados da USP		
Rigidez vertical [kN/m ²]	$K_{usp,v}$	—
Rigidez horizontal [kN/m ²]	$K_{usp,h}$	4×10^5

Os parâmetros da sub-estrutura da via são exibidos na Tabela 5.4, o módulo de elasticidade da fundação é um parâmetro variável, logo não é apresentado nesta tabela.

5.3.2 Variáveis do estudo paramétrico

Nesta secção são apresentadas as variáveis do estudo paramétrico, nomeadamente a rigidez vertical dos elementos resilientes apresentada na Tabela 5.5 e o módulo de elasticidade da fundação apresentado na Tabela 5.6.

Os elementos resilientes da via férrea são: as palmilhas de travessa (USP) e as

Tabela 5.4: Parâmetros da sub-estrutura constantes no estudo paramétrico

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_b	1,50
Módulo de elasticidade [MPa]	E_b	130
Coeficiente de poisson	ν_b	0,20
Espessura da camada [m]	e_b	0,3
Dados do sub-balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_{sb}	1,90
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{sb}	200
Coeficiente de poisson	ν_{sb}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{sb}	0,30
Dados da camada de coroamento		
Densidade[t/m ³]	ρ_{crm}	1,90
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{crm}	250
Coeficiente de poisson	ν_{crm}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{crm}	0,20
Dados do solo de fundação		
Densidade[t/m ³]	ρ_{fd}	2,00
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{fd}	—
Coeficiente de poisson	ν_{fd}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{fd}	9,60

palmilhas de carril (RP¹) . A escolha da rigidez destes elementos apresentada na Tabela 5.5, teve como base os valores extremos encontrados na bibliografia.

Tabela 5.5: Parâmetros dos elementos resilientes

Nº.	RP [kN/mm]	USP [N/mm ³]
1	40,0	0,13
2	100	0,17
3	200	0,21
4	300	0,25
5	400	0,30
6	500	3,30 (REF,sem USP)

Os valores do módulo de elasticidade da fundação expostos na Tabela 5.6 encontram-se divididos em três colunas. Na primeira encontram-se módulos de elasticidade de fundações muito más, possivelmente incompatíveis com as exigências ferroviárias sem que sejam alvo de tratamentos adicionais. A segunda e terceira colunas correspondem a gama de módulos de elasticidade mais frequentes de encontrar em plataformas ferroviárias, onde a segunda coluna se referente a solos moles a medianamente rígidos, e a terceira coluna a solos medianamente rígidos a muito rígidos. Na terceira coluna foi aumentado o espaçamento entre os respetivos módulos de elasticidade para cobrir uma maior gama de valores sem aumentar o número de modelos analisados. A organização dos valores bem como a sua escolha tem intrínseco o objetivo de identificar

¹ Palmilhas de carril, do inglês Rail Pad

a influência deste parâmetro no deslocamento vertical do carril, inclusive para valores menos usuais de módulos de elasticidade da fundação.

Tabela 5.6: Módulos de elasticidade do solo no estudo paramétrico

Módulo de elasticidade [MPa]		
12,5	60,0	200
25,0	80,0	250
40,0	100	300
–	120	350
–	140	400
–	160	450
–	180	500

5.4 Apresentação dos resultados do estudo paramétrico

A realização deste estudo consistiu em desenvolver e analisar 612 modelos para cobrir todas as combinações possíveis relativamente às variáveis do estudo apresentadas na Secção 5.3.2, e perceber a sua influência no deslocamento vertical do carril.

Este estudo depende de três variáveis: o módulo de elasticidade da fundação e a rigidez das RP e das USP. Analisar graficamente o problema implica incluir um quarto parâmetro, nomeadamente o deslocamento vertical do carril. Para facilitar a representação gráfica, optou-se por em calcular a rigidez equivalente dos elementos resilientes nomeadamente as RP e USP, reduzindo assim um parâmetro. Para isso utilizou-se o modelo da Figura 5.5, que corresponde a um sistema de molas associadas em paralelo e série.

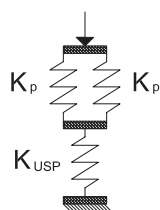


Figura 5.5: Sistema de rigidez equivalente

A resolução matemática do sistema de rigidez equivalente é obtido pela Equação (5.2). Em que: K_{eq} corresponde à rigidez equivalente, K_p corresponde à rigidez da palmilha de carril e K_{USP} corresponde à rigidez da palmilha de travessa.

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{2.K_p} + \frac{1}{K_{USP}} \quad (5.2)$$

Importa ainda salientar que para obter a rigidez da USP foi considerada toda a área de contacto entre a travessa e o balastro.

A Figura 5.6, apresenta o deslocamento vertical do carril em função do módulo de elasticidade da fundação e da rigidez equivalente dos elementos resilientes. Analisando a figura, é possível perceber que para o domínio das variáveis do estudo paramétrico, o módulo de elasticidade da fundação tem mais influência no deslocamento vertical do carril do que a rigidez equivalente dos elementos resilientes. É possível perceber que não existe uma relação linear relativamente ao deslocamento do carril para os valores intermédios do módulo de elasticidade da fundação.

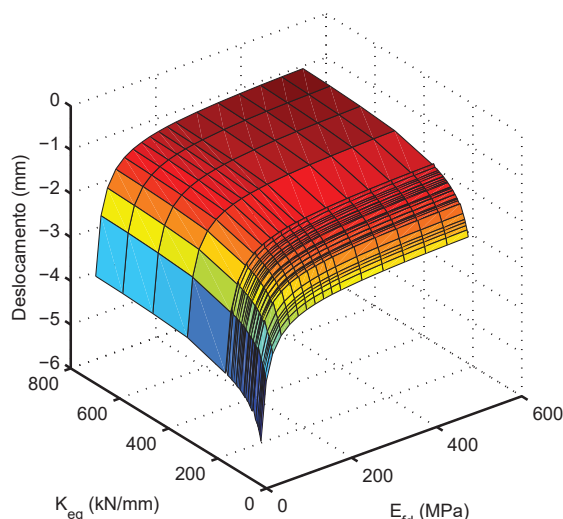


Figura 5.6: Deslocamento do carril em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação

No Anexo A, são apresentados os resultados em gráficos 2D para as diferentes combinações de elementos resilientes, bem como uma equação que permite obter resultados aproximados da Figura 5.6.

Cruzando os dados da Tabela 5.6, que apresenta os módulos de elasticidade da fundação com o gráfico da Figura 5.6, percebe-se que os valores da primeira coluna da tabela são desadequados às exigências ferroviárias devido à enorme variabilidade que estes promovem no deslocamento do carril. Os valores da segunda coluna da tabela não apresentam uma variação linear relativamente ao deslocamento do carril, no entanto apresentam uma variabilidade bastante menor relativamente aos deslocamentos. Os valores da terceira coluna da tabela apresentam uma influência reduzida no deslocamento do carril, e esta influência aparenta ter uma variação linear.

A rigidez equivalente dos elementos resilientes também não apresenta uma variação linear relativamente ao deslocamento do carril e tem uma influência reduzida comparativamente ao módulo de elasticidade da fundação. Devido a este parâmetro ser uma rigidez equivalente não é facilmente relacionável com a combinação de elementos resilientes que lhe deu origem. Contudo, através da análise deste parâmetro é possível perceber que através da combinação adequada de elementos resilientes é possível obter um grande controlo sobre

o deslocamento vertical do carril. No entanto, uma combinação de RP e USP demasiado flexível, mesmo associada a uma fundação razoável, pode promover deslocamentos do carril superiores a 2 mm, o que pode ser desadequado para as exigências ferroviárias.

A Figura 5.7, mostra a análise em percentagem da força transmitida pela travessa ao balastro. Importa salientar que a esta força foi retirado o estado inicial de forças da via. Isto consiste em considerar que os elementos da estrutura da via não têm peso próprio, a única força contabilizada é -250 kN, esta correspondente à carga máxima por eixo do material circulante.

Observando a Figura 5.7, conclui-se que o módulo de elasticidade da fundação não tem influência significativa na força transmitida ao balastro contrariamente ao que acontece com o deslocamento do carril na Figura 5.6. Já relativamente à rigidez equivalente dos elementos resilientes, esta apresenta uma influência significativa na força transmitida pela travessa ao balastro.

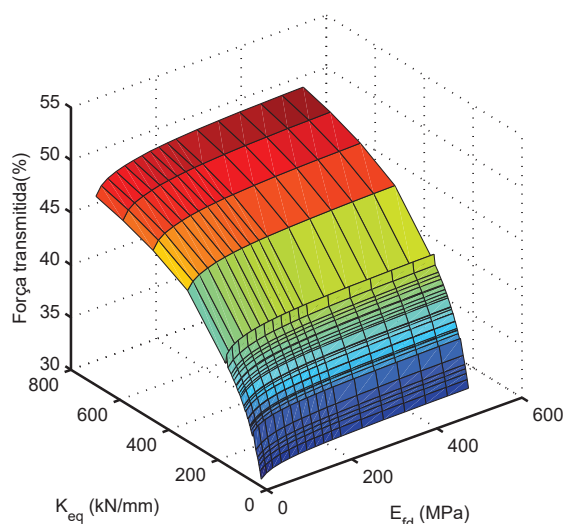


Figura 5.7: Força transmitida ao balastro em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação

Analisando o caso particular das primeiras quatro curvas que correspondem aos valores mais elevados de rigidez equivalente dos elementos resilientes, que por sua vez, correspondem aos modelos sem USP com RP de 500, 400, 300 e 200 kN/mm, conclui-se que estes modelos apresentam uma transmissão de força elevada. Contudo todos os outros modelos apresentam uma transmissão de força efetivamente menor. Por outro lado, cruzando estes valores com os da Figura 5.6, e desprezando os valores correspondentes às fundações de menor módulo de elasticidade, encontra-se uma gama de valores potencialmente compatíveis com as exigências ferroviárias e que minimizam efetivamente a força transmitida ao balastro.

Capítulo 6

Análise de modelos com cargas dinâmicas

6.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se analisar modelos com cargas dinâmicas, ou seja considerar que o veículo circula sobre a via. Nesse sentido, serão abordados dois estudos de caso: uma transição brusca da rigidez da fundação, e uma via que apresenta desgaste ondulatório.

O primeiro caso tem como objetivo testar a premissa da realização do estudo paramétrico. Esta premissa considera que caso o deslocamento estático do carril seja aproximadamente constante ao longo da direção longitudinal da via é expectável que se obtenha um comportamento dinâmico adequado do sistema. Para estudar este caso será desenvolvido um modelo numérico em que está presente uma transição brusca do módulo de elasticidade do solo no desenvolvimento longitudinal da via. Neste modelo não serão considerados defeitos de nivelamento da via nem irregularidades do plano de contacto roda-carril. Será considerado um modelo de comboio tipo (bogie com meia caixa). Este modelo foi apresentado no Capítulo 3 e pode ser visto na Figura 6.1, e pretende representar parcialmente o comboio Alfa Pendular a circular a uma velocidade constante de 220 km/h. Na Tabela 6.5, são apresentadas as características do veículo obtidas na bibliografia (Paixão, 2014).

O segundo estudo de caso permite analisar a possibilidade de aplicar USP a uma via que apresenta desgaste ondulatório do carril. Neste sentido, será desenvolvido um modelo numérico em que a fundação é considerada homogénea na direção longitudinal da via. Neste estudo de caso serão consideradas as irregularidades de nivelamento da via bem como as da mesa de rolamento do carril. Será considerado igualmente um modelo de veículo que representa uma bogie com meia caixa do comboio alfa pendular, a circular a uma velocidade de 45 km/h.

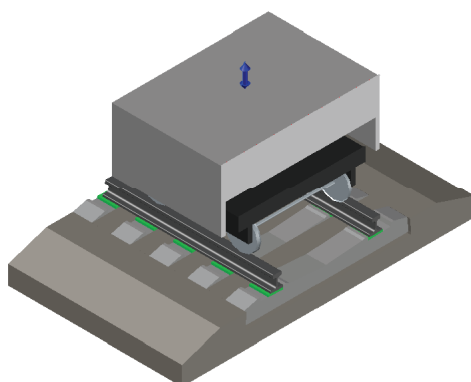


Figura 6.1: Modelo de veículo adotado nos ensaios dinâmicos

6.2 Estudo da variação brusca de rigidez da via

Este estudo para além de pretender validar os pressupostos do estudo paramétrico, também tem como objetivos aferir: o deslocamento vertical do carril, bem como as forças de interação roda-carril e travessa-balastro. A utilização de um modelo de veículo mais complexo permite obter informação mais fidedigna e detalhada do comportamento dinâmico do sistema veículo-via, por simular com mais detalhe a realidade.

Neste estudo será desenvolvido um modelo numérico designado "modelo de referência" em que não serão utilizadas USP. Também, será desenvolvido um segundo modelo numérico com base no estudo paramétrico do Capítulo 5, que visa, dentro do possível, homogeneizar o deslocamento estático do carril. Esta homogeneização será conseguida combinando adequadamente os elementos resilientes. No entanto, destes apenas serão variadas as USP. Isto significa que as palmilhas de carril não serão alteradas tanto no modelo de referência como em todos os outros.

6.2.1 Descrição do modelo

A super-estrutura da via que se pretende modelar é constituída por: carris tipo 60E1 dispostos segundo a bitola ibérica e por travessas em betão pré-esforçado do tipo monobloco com 2,6 m de comprimento por 0,3 m de largura.

A sub-estrutura da via (sistema balastro-fundação) é constituída por: uma camada de balastro com 0,3 m de espessura, uma camada de sub-balastro com 0,3 m de espessura, uma camada de coroamento com 0,2 m de espessura e finalmente a fundação. A fundação é dividida longitudinalmente em três zonas. As zonas inicial e final são constituídas por uma fundação com um módulo de elasticidade mais baixo $E_{fd} = 120$ MPa, ao passo que a zona central é constituída por uma fundação muito rígida $E_{fd} = 500$ MPa.

A Figura 6.2, representa esquematicamente a estrutura do modelo numérico descrito, para além de, também apresentar as suas dimensões geométricas. Importa ainda salientar que na base do modelo numérico foi considerado um solo com $E_{fd} = 500$ MPa ao longo de toda a sua direção longitudinal. As restrições nodais da base do modelo foram calculadas com base nesta camada.

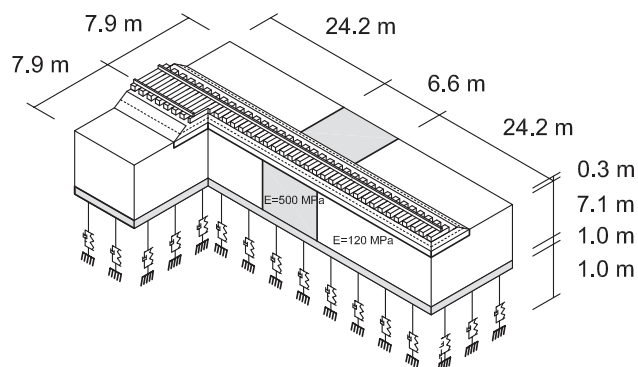


Figura 6.2: Dimensões do modelo com variação longitudinal da rigidez da fundação

A Tabela 6.1, apresenta os parâmetros da super-estrutura da via. Estes parâmetros são constantes em todos os modelos numéricos.

Na Tabela 6.2, apresenta a distribuição das USP pelos troços: inicial, central (onde se pretende corrigir a rigidez) e final. A Tabela 6.3, apresenta os parâmetros que caracterizam a rigidez e amortecimento das USP por metro linear de travessa, o programa "Pegasus" por sua vez vai distribuir estes parâmetros pelo comprimento de influência do nó dos elementos finitos tipo barra.

Os parâmetros da sub-estrutura da via são apresentados na Tabela 6.4. Importa referir que apenas se alterou o módulo de elasticidade da fundação no centro do modelo, como pode ser observado na Figura 6.2.

6.2.2 Resultados da variação brusca de rigidez da via

Como foi referido acima, um dos objetivos pretendidos é testar a metodologia de pré-dimensionamento de USP.

Com base na Equação (A.2), apresentada do anexo A, estimou-se um deslocamento diferencial no carril de 0,15 mm e 0,02 mm, para a solução sem e com USP respetivamente. Esta estimativa assumiu que e que o veículo tem uma carga por eixo de 132 kN que corresponde aproximadamente à carga do comboio Alfa Pendular. A Tabela 6.6, apresenta um resumo do pré-dimensionamento da combinação de USP. As palmilhas de carril foram mantidas constantes nos dois modelos.

Na Tabela 6.7, são apresentadas as diferenças absolutas entre os deslocamentos estimados pela Equação (A.2), e os obtidos nos modelos numéricos. Estas

Tabela 6.1: Parâmetros da super-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do carril 60E1		
Densidade [t/m ³]	ρ_{cr}	7,86
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{cr}	210
Área [m ²]	A_{cr}	$76,7 \times 10^{-4}$
Inércia vertical [m ⁴]	$I_{cr,v}$	$3038,3 \times 10^{-8}$
Inércia horizontal [m ⁴]	$I_{cr,h}$	$512,3 \times 10^{-8}$
Dados das palmilhas de carril e fixações		
Massa [kg]	m_p	5,00
Rigidez na direção x [kN/m]	$K_{x,p}$	$50,0 \times 10^3$
Rigidez na direção y [kN/m]	$K_{y,p}$	$50,0 \times 10^3$
Rigidez na direção z [kN/m]	$K_{z,p}$	100×10^3
Amortecimento na direção x [kN.s/m]	$C_{x,p}$	12
Amortecimento na direção y [kN.s/m]	$C_{y,p}$	12
Amortecimento na direção z [kN.s/m]	$C_{z,p}$	12
Dados da travessa		
Massa [kg]	m_{tr}	330
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{tr}	30,0

Tabela 6.2: Disposição das USP nos modelos numéricos

Modelo	Troço inicial	Troço central	Troço final
Referência	s/USP	s/USP	s/USP
USP1 e USP5	USP5	USP1	USP5
USP2 e USP5	USP5	USP2	USP5
USP3 e USP5	USP5	USP3	USP5
USP4 e USP5	USP5	USP4	USP5
USP5 e USP5	USP5	USP5	USP5

Tabela 6.3: Parâmetros de caracterização das USP adotadas nos modelos numéricos

Nomenclatura	$K_{usp,v}$ [kN/m ²]	$K_{usp,h}$ [kN/m ²]	$C_{usp,v}$ [kN.s/m/m]	$C_{usp,h}$ [kN.s/m/m]
s/USP	$6,25 \times 10^6$	$4,00 \times 10^5$	2,50	1
USP1	$3,90 \times 10^4$	$1,30 \times 10^4$	4,46	1
USP2	$5,10 \times 10^4$	$1,70 \times 10^4$	5,18	1
USP3	$6,30 \times 10^4$	$2,10 \times 10^4$	5,90	1
USP4	$7,50 \times 10^4$	$2,50 \times 10^4$	6,62	1
USP5	$9,00 \times 10^4$	$3,00 \times 10^4$	7,52	1

Tabela 6.4: Parâmetros da sub-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_b	1,50
Módulo de elasticidade [MPa]	E_b	130
Coeficiente de poisson	ν_b	0,20
Espessura da camada [m]	e_b	0,30
Dados do sub-balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_{sb}	1,90
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{sb}	200
Coeficiente de poisson	ν_{sb}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{sb}	0,30
Dados da camada de coroamento		
Densidade[t/m ³]	ρ_{crm}	1,90
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{crm}	150
Coeficiente de poisson	ν_{crm}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{crm}	0,20
Dados do solo de fundação		
Densidade[t/m ³]	ρ_{fd}	2,00
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{fd}	120/500
Coeficiente de poisson	ν_{fd}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{fd}	9,60

Tabela 6.5: Parâmetros do Alfa Pendular, adaptado de (Paixão, 2014)

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do eixo		
Massa [t]	M_e	1,800
Inércia de rotação em torno de x [t.m ²]	$I_{x,e}$	0,900
Raio da roda [m]	R_e	0,445
Distância entre eixos [m]	D_e	2,700
Dados da bogie		
Massa [t]	M_b	4,932
Inércia de rotação em torno de x [t.m ²]	$I_{x,b}$	2,100
Inércia de rotação em torno de y [t.m ²]	$I_{y,b}$	2,600
Dados da Caixa		
Massa [t]	M_{cx}	36,759
Dados do sistema de suspensão primário		
Rigidez da suspensão [kN/m]	K_{sp}	2 x 564
Capacidade do amortecedor [kN.s/m]	C_{sp}	18
Distância entre suspensões no eixo [m]	$d_{sp,y}$	2,14
Dados do sistema de suspensão secundário		
Rigidez da suspensão [kN/m]	K_{ss}	1025,6
Capacidade do amortecedor [kN.s/m]	C_{ss}	70

Tabela 6.6: Pré-dimensionamento da combinação de USP, estimativa do deslocamento do carril

	$E_{fd} = 500 \text{ MPa}$	$E_{fd} = 120 \text{ MPa}$	Diferença
Ref. (sem USP)	- 0,54	-0,69	0,15
USP2 e USP5	-0,84	-0,86	0,02

diferenças são superiores no solo com $E_{fd} = 120$ MPa. Isto deve-se a uma maior influência da proximidade dos dois eixos da bogie na bacia de deslocamentos formada. Num solo muito rígido, os eixos no limite formam bacias de deslocamentos essencialmente individuais. Por outro lado, num solo muito flexível, estas bacias tendem a juntar-se. Isto faz com que considerando mais eixos a estimativa de deslocamentos piore, pois afasta-se das condições do estudo paramétrico onde apenas se considerou um eixo.

A Figura 6.3, apresenta o máximo deslocamento negativo do carril nos modelos analisados. Nesta figura observa-se que as USP aumentam o deslocamento do carril, como esperado. Verifica-se que utilizando a USP2 é possível homogeneizar estes deslocamentos (linha vermelha do gráfico), e que utilizando a USP1 (linha azul do gráfico) os deslocamentos são mais próximos entre os três troços do modelo, mas os deslocamentos nos extremos da zona central apresentam-se em forma de lomba. Isto evidencia um mau comportamento nas forças de contacto roda-carril. Conclui-se por isso que a solução com USP2 corresponde à combinação mais adequada

Tabela 6.7: Comparação entre deslocamentos estimados pela Equação (A.2) e os obtidos nos modelos numéricos

Modelos Fundação	Ref. (sem USP)		USP2 e USP5	
	$E_{fd} = 120$ MPa	$E_{fd} = 500$ MPa	$E_{fd} = 120$ MPa	$E_{fd} = 500$ MPa
Estimado (mm)	-0,69	-0,54	-0,86	-0,84
Modelado (mm)	-0,75	-0,52	-0,93	-0,81
Diferença (mm)	0,06	0,02	0,07	0,03

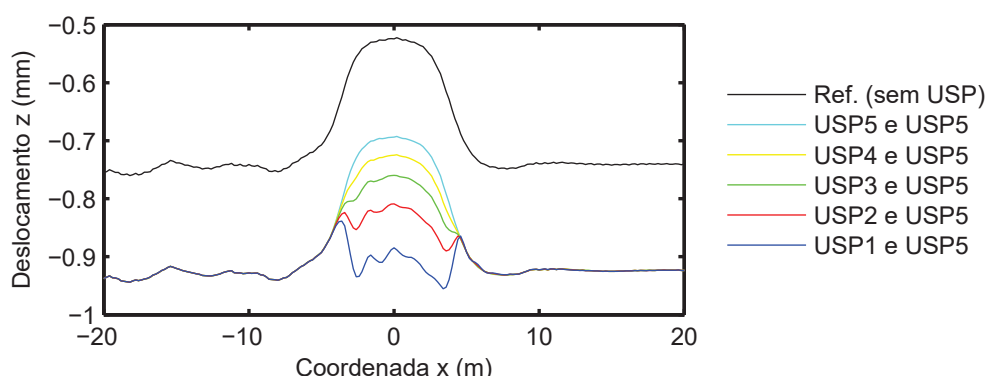


Figura 6.3: Máximo deslocamento negativo do carril

A Figura 6.4, apresenta os resultados numéricos das forças de interação roda-carril do primeiro eixo da bogie na roda esquerda, para os modelos expostos na Secção 6.2.1. Importa salientar, que nestes resultados foi aplicado um filtro (passa-baixo) de 150 Hz, limitando a análise destas forças às excitações provocadas pelo espaçamento entre travessas. Este filtro foi aplicado uma vez que não foram considerados defeitos de via, quer de nivelamento, quer de irregularidades no plano de contacto roda-carril. Ainda nesta figura, pode concluir-se que a utilização de USP reduz em termos gerais as forças de interação

roda-carril em todos os modelos numéricos apresentados. Este facto contrasta com o observado no Capítulo 4, Secção 4.3, em que o efeito da utilização de USP era aparentemente irrelevante quando este parâmetro foi analisado, apesar da consulta bibliográfica apontar em sentido contrário. Este fenómeno pode ser explicado essencialmente por duas razões fundamentais. O primeiro facto a ter em conta é que a velocidade do material circulante é bastante diferente, 80 km/h para o caso apresentado no Capítulo 4 face aos 220 km/h considerados nestes modelos numéricos. O segundo facto a ter em conta é o modelo de veículo adotado: no primeiro caso devido a não existir informação disponível adotou-se um modelo de veículo que representa o eixo do material circulante, ao passo que nestes modelos numéricos foi adotado um modelo de veículo que representa a bogie com meia caixa do material circulante. Importa salientar que para além disso as cargas por eixo são diferentes, 190 kN no primeiro caso, ao passo que nestes modelos numéricos a carga por eixo é de 132 kN.

Analisando a linha a preto da Figura 6.4 (que corresponde ao modelo de referência no qual não estão instaladas USP), apesar da variação brusca de rigidez da fundação, não se nota qualquer amplificação da força da interação roda-carril. Isto deve-se essencialmente ao perfil da estrutura da via adotado. Sobre a fundação são colocados 0,5 m de camadas de reforço (camada de sub-balastro e camada coroamento), o que faz com que exista uma ótima distribuição de cargas para a fundação, reduzindo a influência da fundação nas forças de interação roda-carril.

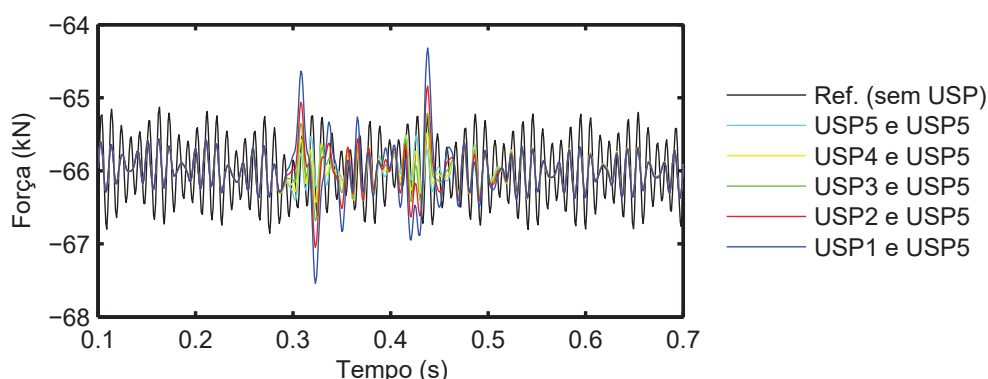


Figura 6.4: Forças de interação roda-carril numa variação brusca da rigidez da fundação, considerando a utilização, ou não de USP

As Figuras 6.5 (a) e (b), apresentam duas zonas específicas da Figura 6.4. A primeira Figura 6.5 (a) "zona homogénea" corresponde a uma zona do modelo numérico em que o solo da fundação foi modelado com um módulo de elasticidade de 120 MPa. A segunda Figura 6.5 (b), corresponde à zona no modelo onde o módulo de elasticidade do solo de fundação passa de 120 MPa para 500 MPa, ou seja, "zona de transição".

Observando a Figura 6.5 (a), conclui-se que utilizando a USP5 (a mais rígida) é possível reduzir as forças de interação roda-carril. Contudo, observando a Figura 6.5 (b), conclui-se que quanto mais flexível é a USP utilizada, maior a amplificação da força de contacto roda-carril nos extremos da zona central.

Esperava-se do pré-dimensionamento e da análise da Figura 6.3, que a USP2 (correspondente à linha a vermelho) apresentasse o melhor resultado, no entanto, a USP4 (correspondente à linha a amarelo) aproxima as amplitudes das forças apesar de ser muito mais rígida que a USP2 pré-dimensionada inicialmente.

O estudo paramétrico permitiu desenvolver uma equação que estima razoavelmente o deslocamento do carril (diferenças na ordem das centésimas de milímetro), com base neste estudo foi possível homogeneizar bastante bem os deslocamentos do carril. Contudo, a prescrição de uma transição brusca de rigidez de USP para corrigir o deslocamento provocou alguma amplificação dinâmica da resposta veículo-via, como pode ser comprovado pela Figura 6.5 (b). No entanto, analisando a figura, num contexto mais amplo, verifica-se que a amplificação é mínima quando comparada com a provocada por defeitos de nivelamento na via ou irregularidades na mesa de rolamento do carril. Isto pode ser observado comparando esta figura com a Figura 4.20 do Capítulo 4, em que se observa que a dispersão de valores em relação à carga estática é bastante superior.

No estudo apresentado por Paixão (2014), que compara duas zonas de transição: uma com USP e outra sem a utilização USP, o autor conclui que a utilização do "bloco técnico"¹ nestas zonas corrige o problema da transição de rigidez de forma eficiente, e que a solução adotada de utilizando bloco técnico conjuntamente com USP aparenta ser demasiado flexível.

Em linha com o concluído em (Paixão, 2014), também este estudo de caso evidencia que é necessária alguma prudência ao prescrever transições bruscas de rigidez com recurso a USP. No entanto, a Figura 6.5 (a) mostra que a utilização da USP5 (rígida) permite uma redução da amplificação das forças de contacto roda-carril na zona homogénea da via.

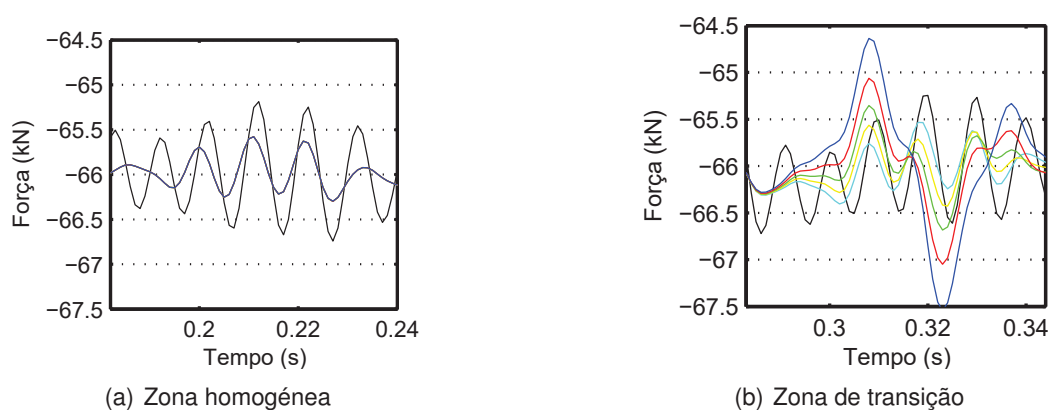


Figura 6.5: Forças de interação roda-carril numa variação brusca da rigidez da fundação, em zona homogénea e de transição

A Figura 6.6, apresenta os resultados das máximas forças de interação

¹solução de aterro em forma de cunha em que são utilizados solos tratados com cimento e solos selecionados, esta solução permite uma transição de rigidez suave, é possível obter mais informações sobre o tema em (Paixão, 2014; Fontul, 2015)

travessa-balastro obtidas através dos modelos numéricos. Importa salientar, que a estes dados foi retirado o estado inicial de forças da via, isto é, as forças devidas ao peso próprio dos elementos que constituem a super-estrutura da via. Em suma é apenas considerada a componente da força induzida pelo material circulante.

Pela observação da Figura 6.6, conclui-se que a utilização de USP reduz as forças de interação travessa-balastro, contribuindo assim para um melhor comportamento da camada de balastro a longo prazo. Assumindo uma forte influência destas forças nos assentamentos desta camada, também se antevê que esta sofra menores deformações tanto reversíveis como irreversíveis.

Linearmente ao observado na Figura 6.5 (b), também na Figura 6.6 se conclui que a utilização da USP4 (correspondente à linha a amarelo) no troço central do modelo apresenta melhores resultados que a USP2 (correspondente à linha a vermelha).

Extrapolando estas conclusões para os assentamentos a longo prazo da camada de balastro, é expectável que a utilização da combinação inicialmente pré dimensionada (USP2 e USP5), possa promover a redução dos assentamentos a longo prazo comparativamente à solução sem USP. Contudo, a utilização desta combinação embora homogeneíze os deslocamentos verticais do carril como foi observado na Figura 6.3, pode promover assentamentos diferenciais superiores ao modelo de referência uma vez que a variação da força é superior com se observa na Figura 6.3. Contudo, esta previsão implicaria encaixar estes dados num modelo de assentamento do balastro adequado.

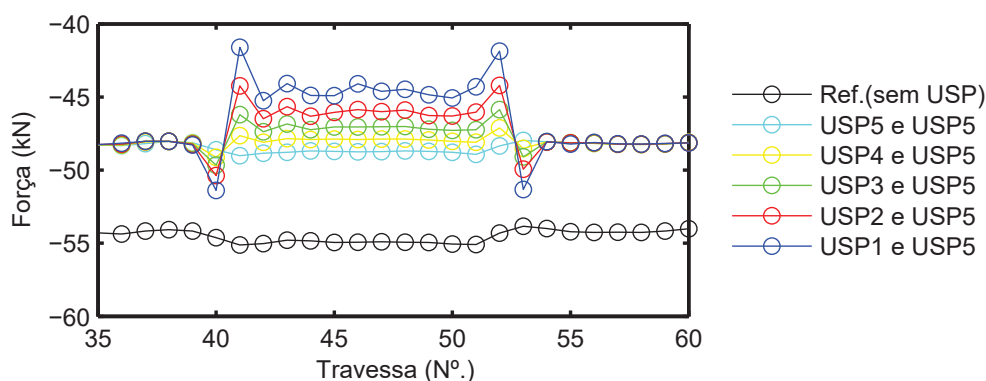


Figura 6.6: Forças de interação travessa-balastro numa variação brusca da rigidez da fundação, considerando a utilização, ou não, de USP

6.3 Estudo de um troço de via com desgaste ondulatorio

O desgaste ondulatorio manifesta-se longitudinalmente na mesa de rolamento do carril. Este desenvolve-se como consequência da interação dinâmica entre o

veículo e a via. Existe alguma propensão para este defeito aparecer na "fila baixa"² de curvas de pequeno raio. Estas curvas, pelas suas características geométricas, localizam-se essencialmente em zonas de tráfego urbano. A bibliografia porém, relata casos relativos ao aparecimento deste defeito em curvas de grande raio e mesmo em retas. O aparecimento deste defeito provoca a degradação da geometria da via, e pode contribuir ativamente para a falha de alguns elementos desta por fadiga, como é o caso dos carris e fixações.

Um dos aspetos apresentados por (Varandas et al., 2012), para minorar os efeitos nefastos deste tipo de defeito consiste em aplicar palminhas de carril mais suaves. Também foi apresentado por (Sol-Sánchez et al., 2015) que a aplicação de USP pode minorar estes efeitos em curvas de pequeno raio.

A partir dos comprimentos de onda e das amplitudes pico-a-pico são definidos critérios para aferir se o carril apresenta desgaste ondulatório. A norma EN 13231-3 define esses critérios e são apresentados na Tabela 6.8. Contudo, esta norma não define os limites para os quais é necessário efetuar intervenções corretivas, impor estes limites cabe aos gestores ferroviários. Segundo a experiência da IP³ os comprimentos de onda mais frequentes são os curtos e longos apresentados na Tabela 6.8, e os limites de amplitude pico-a-pico para intervenção são respetivamente $\pm 0,05$ mm e $\pm 0,15$ mm.

Tabela 6.8: Critérios de aceitação do desgaste ondulatório do carril, adaptado de (Varandas et al., 2012)

Designação	Comprimentos de onda	Amplitudes pico-a-pico
Ondas muito curtas	10 - 30 mm	$\pm 0,010$ mm
Ondas curtas	30 - 100 mm	$\pm 0,010$ mm
Ondas longas	100 - 300 mm	$\pm 0,015$ mm
Ondas muito Longas	300 - 1000 mm	$\pm 0,075$ mm

6.3.1 Descrição do estudo de caso

Nesta secção pretende-se simular a aplicação de USP numa via com desgaste ondulatório. Esta via foi instrumentada com sismógrafos da marca SYSCOM. Estes são compostos por um geofone que pode ser visto na Figura 6.7 e uma unidade de aquisição e gravação de sinal. Com estes dados foi possível desenvolver e calibrar um modelo numérico no programa "Pegasus" por (Varandas et al., 2012, 2013b). Será nesse modelo numérico previamente calibrado que serão feitas as simulações deste estudo de caso.

A zona em causa localiza-se na Linha de Cintura em Lisboa, na curva entre a estação de Entrecampos e a estação de Sete Rios (PK4,800-PK6,000), com aproximadamente 300 m de raio. A infra-estrutura da via é composta por carril

²Carril interno da curva, ou carril mais baixo atendendo à definição de escala da via

³Infraestruturas de Portugal, S.A.

60E1, travessas de betão pré-esforçado tipo monobloco com fixações do tipo Vossloh. Esta via assenta sobre uma camada de balastro granítico com 30 cm de espessura média.

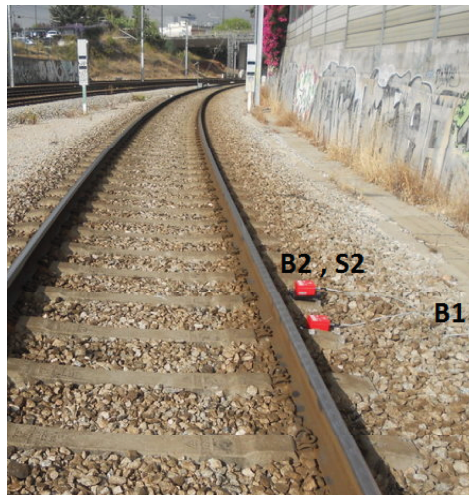


Figura 6.7: Via de Cintura, retirado de (Varandas et al., 2013b)

Existem disponíveis os dados do nivelamento obtidos pelo equipamento EM120, e os dados das irregularidades obtidos pelo equipamento "RMF" do fabricante (Vogel e Plötscher).

As Figuras 6.8 (a) e (b), apresentam os dados do desgaste ondulatório, filtrados segundo os comprimentos de onda (30 a 100 mm) e (100 a 300 mm) expostos na Tabela 6.8, e os limites para intervenção em vigor nas IP. Observando a Figura 6.8 (a) conclui-se que a via em causa ultrapassa os limites impostos pela IP, logo torna-se necessário realizar uma intervenção corretiva.

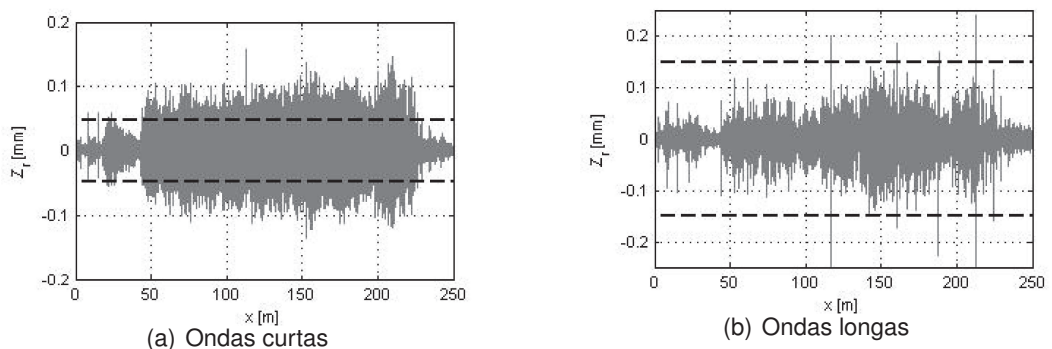


Figura 6.8: Desgaste ondulatório do carril interno da Linha de Cintura, adaptado de (Varandas et al., 2012)

6.3.2 Descrição do modelo

A super-estrutura da via no modelo numérico é composta por: carris tipo UIC60 dispostos segundo a bitola ibérica e por travessas em betão pré-esforçado do tipo monobloco com 2,6 m de comprimento por 0,25 m de largura.

A sub-estrutura da via (sistema balastro-fundação) é constituída por: uma camada de balastro com 0,3 m de espessura, uma camada de sub-balastro com 0,2 m de espessura, uma camada de coroamento com 0,3 m de espessura e finalmente a fundação com 12 m de espessura.

A Figura 6.9, representa esquematicamente a estrutura do modelo numérico descrito e as suas dimensões geométricas.

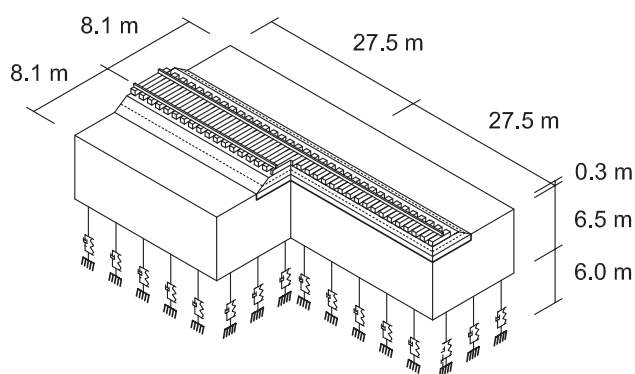


Figura 6.9: Dimensões do modelo numérico da via com desgaste ondulatório

A Tabela 6.9 apresenta os parâmetros da super-estrutura da via. Os parâmetros de contacto entre a travessa e o balastro estão dispostos na Tabela 6.10. No Modelo (1) não estão instaladas USP, ao passo que no Modelo (2) os parâmetros de contacto simularão a existência de USP instaladas. Os parâmetros relativos à sub-estrutura da via são apresentados na Tabela 6.11, os relativos às características do veículo foram apresentados no estudo de caso anterior na Tabela 6.5, uma vez que foi adotado o mesmo modelo de veículo.

A Figura 6.10, apresenta o nivelamento da via. Este nivelamento será introduzido no programa "Pegasus" como nível imposto às travessas. Foram criados dois troços inicial e final em que não existem defeitos de nível. Neste processo procurou-se que a transição ocorresse onde o nivelamento medido pela EM120 se aproximava de zero. Os dados de nivelamento sofreram um tratamento prévio composto por duas fases: na primeira foi feita a média do nivelamento medido nos dois carris, na segunda foi feita uma filtragem do sinal para retirar os comprimentos de onda inferiores a três metros, uma vez que estes serão introduzidos no programa como irregularidades da mesa de rolamento do carril.

A Figura 6.11, apresenta as irregularidades dos carris esquerdo e direito, estes dados foram obtidos com o equipamento RMF que permite medir comprimentos de onda até três metros e grava os dados de 2 em 2 mm. Analogamente

Tabela 6.9: Parâmetros da super-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do carril 60E1		
Densidade [t/m ³]	ρ_{cr}	7,86
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{cr}	210
Área [m ²]	A_{cr}	$76,7 \times 10^{-4}$
Inércia vertical [m ⁴]	$I_{cr,v}$	$3038,3 \times 10^{-8}$
Inércia horizontal [m ⁴]	$I_{cr,h}$	$512,3 \times 10^{-8}$
Dados das palmilhas de carril e fixações		
Massa [kg]	m_p	5,00
Rigidez na direção x [kN/m]	$K_{x,p}$	$65,0 \times 10^3$
Rigidez na direção y [kN/m]	$K_{y,p}$	$65,0 \times 10^3$
Rigidez na direção z [kN/m]	$K_{z,p}$	260×10^3
Amortecimento na direção x [kN.s/m]	$C_{x,p}$	19
Amortecimento na direção y [kN.s/m]	$C_{y,p}$	19
Amortecimento na direção z [kN.s/m]	$C_{z,p}$	19
Dados da travessa		
Massa [kg]	m_{tr}	330
Módulo de elasticidade [GPa]	E_{tr}	37,0

Tabela 6.10: Parâmetros de contacto entre a travessa e o balastro

Parâmetro	Notação	Modelo (1)	Modelo (2)
Dados da USP			
Rigidez vertical [kN/m ²]	$K_{usp,v}$	$6,25 \times 10^6$	$3,90 \times 10^4$
Rigidez horizontal [kN/m ²]	$K_{usp,h}$	$4,00 \times 10^5$	$1,70 \times 10^4$
Amortecimento vertical [kN.s/m/m]	$C_{usp,v}$	2,50	5,18
Amortecimento horizontal [kN.s/m/m]	$C_{usp,h}$	1,00	1,00

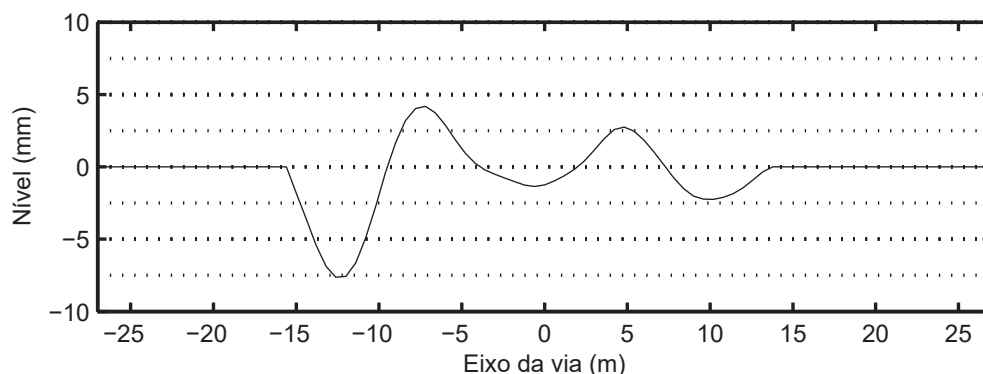
Figura 6.10: Nivelamento da linha de cintura introduzido no modelo numérico ($\lambda > 3.0$ m)

Tabela 6.11: Parâmetros da sub-estrutura

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_b	1,80
Módulo de elasticidade [MPa]	E_b	200
Coeficiente de poisson	ν_b	0,20
Espessura da camada [m]	e_b	0,30
Dados do sub-balastro		
Densidade [t/m ³]	ρ_{sb}	2,00
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{sb}	120
Coeficiente de poisson	ν_{sb}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{sb}	0,20
Dados da camada de coroamento		
Densidade[t/m ³]	ρ_{crm}	2,00
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{crm}	150
Coeficiente de poisson	ν_{crm}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{crm}	0,20
Dados do solo de fundação		
Densidade[t/m ³]	ρ_{fd}	1,70
Módulo de elasticidade [MPa]	E_{fd}	400
Coeficiente de poisson	ν_{fd}	0,30
Espessura da camada [m]	e_{fd}	12,0

ao procedimento anterior, foram criados dois troços inicial e final em que não existem defeitos, e procurou-se que a transição ocorresse onde as irregularidades medidas se aproximavam de zero. Estes dados após o tratamento descrito foram introduzidos no programa "Pegasus", como irregularidades da mesa de rolamento do carril. Analisando a figura é possível concluir que o carril esquerdo (linha a preto) apresenta um sinal mais irregular correspondendo ao desgaste ondulatorio, e na coordenada do eixo da via (-13,2 m) apresenta um pico que corresponde a uma soldadura do carril.

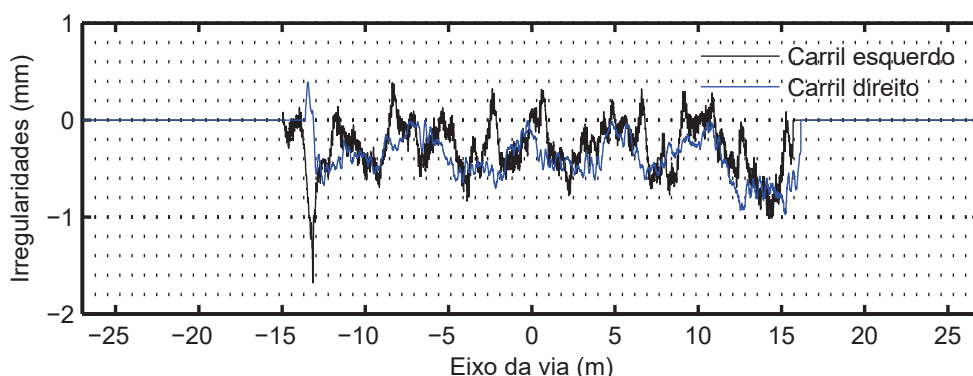


Figura 6.11: Irregularidades da linha de cintura introduzido no modelo numérico ($\lambda < 3.0$ m)

6.3.3 Resultados numéricos da via com desgaste ondulatorio

A Figura 6.12, mostra os resultados numéricos relativos aos máximos deslocamentos verticais dos carris. A estes resultados foram retirados os deslocamentos correspondentes ao peso próprio dos elementos que constituem a estrutura da via. Isso significa que os deslocamentos apresentados são provocados pelas ações impostas pelo veículo a circular sobre a via. Da análise da figura, é possível extrair as seguintes conclusões: O modelo com USP (Mod2) apresenta deslocamentos superiores em magnitude quando comparado com o modelo sem USP (Mod1), e em ambos os modelos o carril esquerdo, com desgaste ondulatorio, apresenta deslocamentos superiores em magnitude, quando comparado com o carril direito.

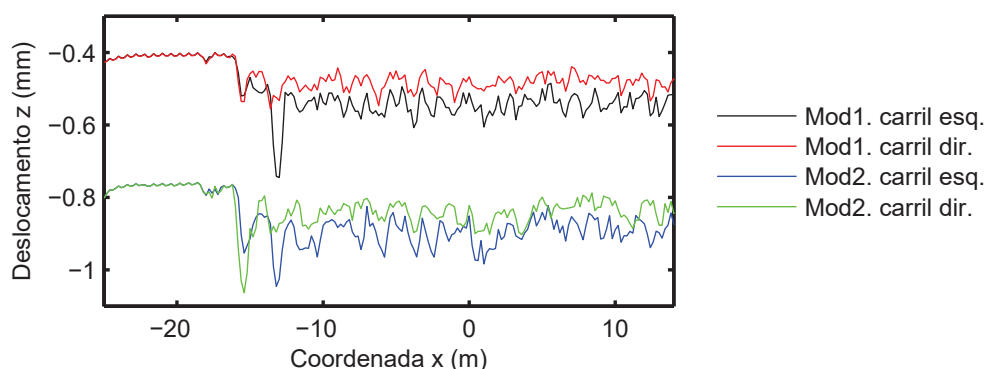


Figura 6.12: Máximo deslocamento negativo no carril, numa via com desgaste ondulatorio

A Figura 6.13, mostra os resultados numéricos das forças de interação roda-carril. Estas forças correspondem a roda esquerda do primeiro eixo do veículo, que circula sobre o carril com desgaste ondulatorio. Analisando a figura, é evidente uma amplificação significativa das forças roda-carril quando o veículo entra na zona da via com desgaste ondulatorio. Contudo, a solução com USP modelo (2) não apresenta melhorias significativas comparando o modelo (1) que corresponde à via sem USP.

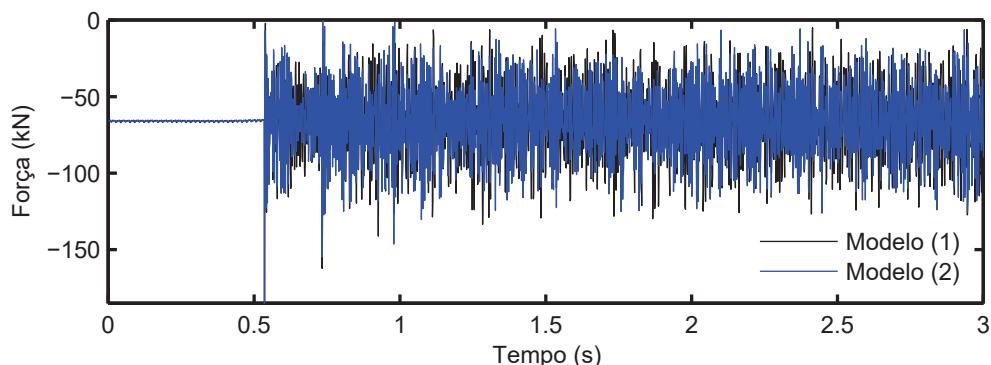


Figura 6.13: Força roda-carril, num carril com desgaste ondulatorio

A Figura 6.14, apresenta os resultados numéricos das forças de interação roda-carril. Estas forças correspondem a roda direita do primeiro eixo do veículo, que circula sobre o carril sem desgaste ondulatorio. Analisando a figura, conclui-se que a amplificação das forças roda-carril é menor quando comparada com o carril que apresenta desgaste ondulatorio na Figura 6.12. Contudo, identicamente ao observado na Figura 6.12, não são evidentes os efeitos positivos no modelo (2) que corresponde à via com USP.

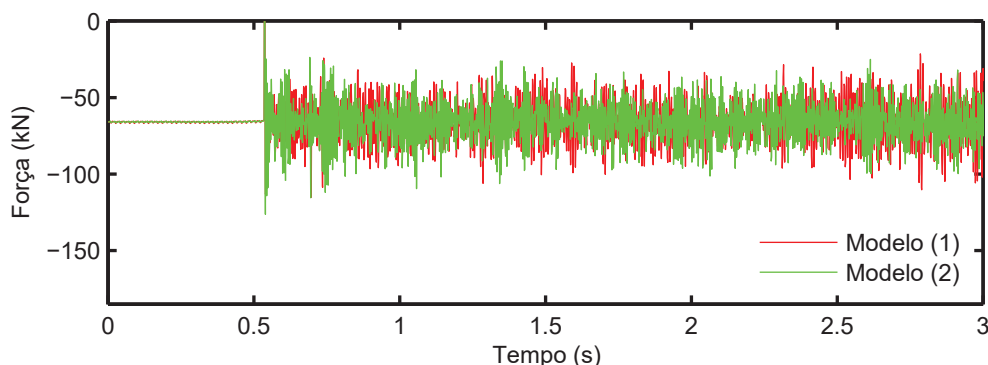


Figura 6.14: Força roda-carril, num carril sem desgaste ondulatorio

A Figura 6.15, apresenta os resultados numéricos de uma solução estudada por (Varandas et al., 2012) para mitigar os efeitos do desgaste ondulatorio. Essa solução não é diretamente comparável com este estudo de caso, uma vez que foi utilizado um modelo 2D uma velocidade diferente e um modelo de veículo diferente. A solução consistiu em reduzir a rigidez da palmilha de carril de 400 kN/mm para 65 kN/mm. Comparando a solução aqui analisada com a apresentada por (Varandas et al., 2012), é possível concluir que para reduzir as forças de interação roda-carril é mais eficiente reduzir a rigidez das palminhas de carril.

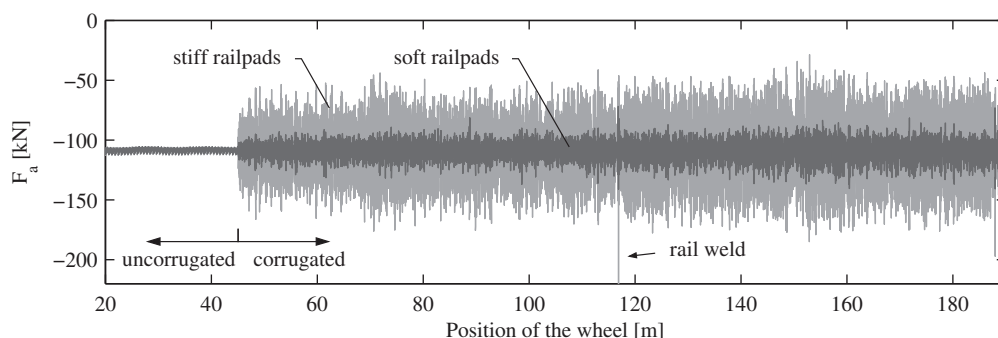


Figura 6.15: Força roda-carril utilizando palmilhas de carril suaves, retirado de (Varandas et al., 2012)

A Figura 6.16, apresenta o conteúdo em frequência das forças de interação roda-carril apresentadas no domínio do tempo nas Figuras 6.13 e 6.14, para o intervalo de tempo entre (1 a 2,5 s). Pela análise desta figura, é possível concluir que a faixa dominante do sinal passou de 150 Hz para 200 Hz, sendo mais evidente para a roda direita que corresponde ao carril sem desgaste ondulatorio.

Isto evidencia que o modelo (1) (sem USP) é mais eficiente a dissipar energia em altas frequências (entre 150 a 230 Hz) que o modelo (2), como a energia nestas frequências não é dissipada com tanta eficiência no contrato entre a travessa e o balastro acaba por ser transmitida ao carril sem desgaste ondulatorio. Contudo, uma capacidade superior de dissipar energia em frequências inferiores a 150 Hz é benéfico para o sistema veículo-via, uma vez que a probabilidade destas serem excitadas é superior. No entanto, caso o carril apresente desgaste ondulatorio este sistema é excitado em frequências bastante elevadas mesmo a velocidades de circulação reduzidas. Isso explica a rápida evolução do desgaste ondulatorio relatada na bibliografia, pela facilidade com que este defeito consegue excitar a frequência de ressonância do sistema originando forças de interação bastante elevadas. A proposta apresentada por (Varandas et al., 2012), apresenta melhores resultados possivelmente porque a frequência de ressonância do sistema é superior ao caso aqui estudado, sendo dominada pelo carril a vibrar sobre as travessas.

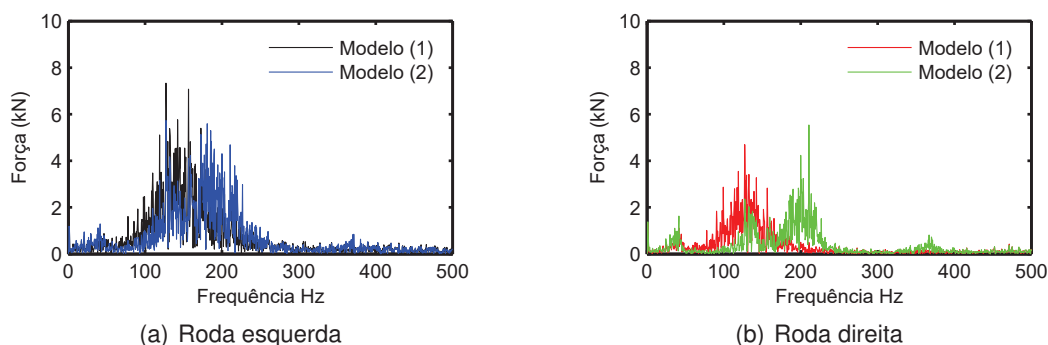


Figura 6.16: Análise das forças de interação roda-carril em frequência

A Figura 6.17 apresenta os resultados numéricos das forças de interação travessa-balastro. Importa salientar que aos resultados apresentados foi retirado o estado inicial de forças da via, o que faz com que nos resultados seja apenas representada a componente da força que provém do veículo. Pela observação da figura, é possível aferir o efeito positivo da utilização de USP, uma vez que as forças travessa-balastro do Modelo (2) apresentam uma magnitude inferior às do Modelo (1). Em suma, o balastro na base da travessa está sujeito a menores solicitações, caso uma via que apresente desgaste ondulatorio tenha USP instaladas. Ou seja, embora a via possa ter alguma propensão para desenvolver desgaste ondulatorio (devido a causas endógenas ou exógenas a mesma) com a instalação de USP certamente a evolução deste defeito será inferior. Mesmo após este aparecer, o balastro de suporte das travessas (na base das mesmas) tenderá a não deteriorar o seu comportamento prematuramente.

As Figuras 6.18 (a), (c), (e) e (g), apresentam os resultados numéricos dos deslocamentos no tempo para diferentes nós do modelo de elementos finitos. As Figuras 6.18 (b), (d), (f) e (h), apresentam os respetivos conteúdos em frequência destes deslocamentos. A via sem USP corresponde ao Mod.(1), e a via com USP

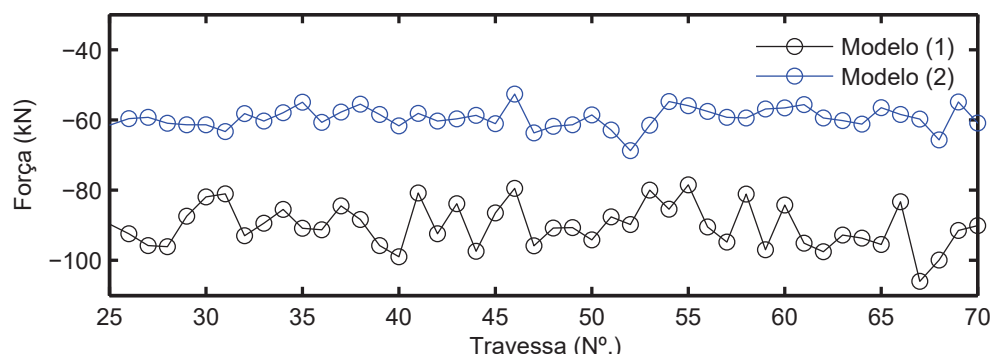
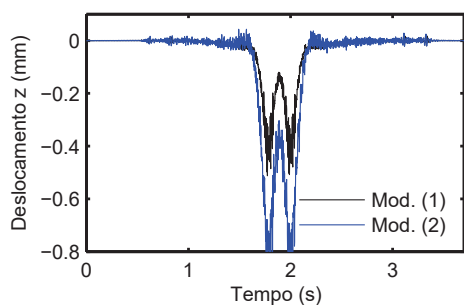


Figura 6.17: Máxima magnitude das forças de interação travessa-balastro numa via com desgaste ondulatório

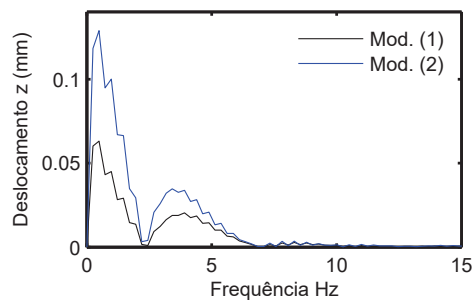
corresponde ao Mod.(2). Os primeiros três nós estão verticalmente alinhados no centro dos modelos (na zona do carril com desgaste ondulatório), o primeiro nó é do carril, o segundo da travessa e o terceiro do balastro. O quarto e ultimo nó corresponde a um ponto no balastro localizado no eixo da via entre duas travessas. Analisando as Figuras 6.18 (a), (c), (e) e (g), é possível concluir que os deslocamentos no Mod.(2) são sempre superiores e apresentam maior dispersão de valores, embora esta diferença diminua bastante quando são analisados os nós do balastro, Figuras 6.18 (e) e (g). Quando se analisa o conteúdo em frequências destes deslocamentos, de forma geral as amplitudes dos dois modelos decrescem quando nos afastamos da fonte de excitação (mesa de rolamento do carril). As amplitudes até 2,5 Hz são sempre superiores no Mod(2) em todos os nós analisados, contudo analisando os nós do balastro as amplitudes para frequências superiores a 2,5 Hz são ligeiramente reduzidas o que evidencia um contributo benéfico da introdução de USP.

Foram analisados os deslocamentos de vários nós dos modelos na Figura 6.18, sendo possível concluir que a introdução de USP aparentemente piora o comportamento dos elementos da super-estrutura da via e os efeitos benéficos sobre a camada de balastro são pouco evidenciados mesmo quando foi analisado o comportamento em deslocamentos do balastro no eixo da via entre duas travessas. Contudo, do ponto de vista das forças de interação travessa-balastro, a redução da magnitude destas é evidente.

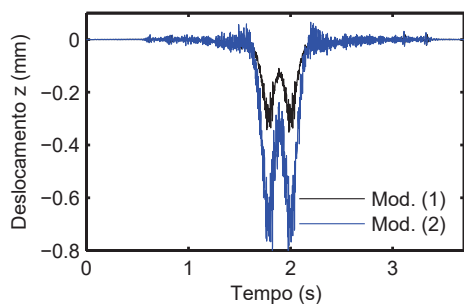
Extrapolando esta análise para o comportamento da via a longo prazo, é expectável que as deformações a longo prazo da via melhorem uma vez que as forças são distribuídas de maneira mais uniforme. No entanto, as deformações globais do balastro são semelhantes, o que se pode concluir pela análise das deformações dos nós de balastro estudados. Por outro lado, como os movimentos da travessa apresentam maiores amplitudes, espera-se que aumente o desgaste da camada de balastro nas zonas de fricção com a travessa. Pelas razões apresentadas, é possível extrapolar a probabilidade do aumento das falhas por fadiga dos elementos da super-estrutura da via.



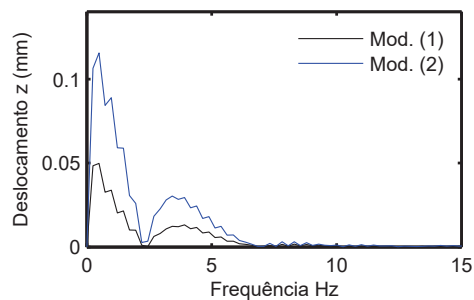
(a) Deslocamentos do carril no tempo



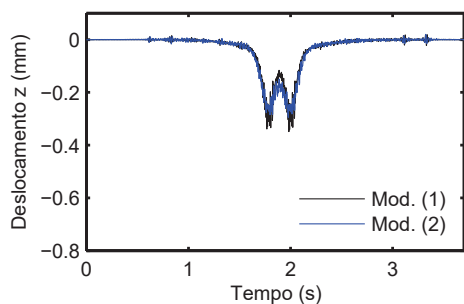
(b) Deslocamentos do carril em frequência



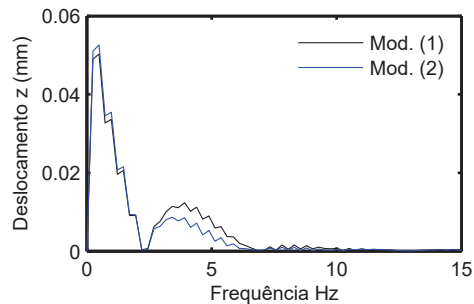
(c) Deslocamentos da travessa no tempo



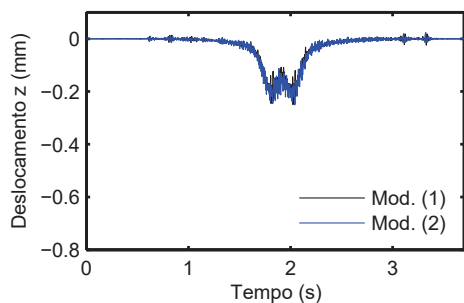
(d) Deslocamentos da travessa em frequência



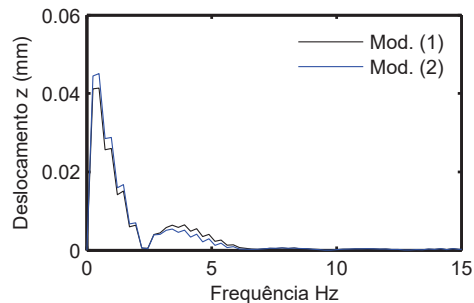
(e) Deslocamentos no balastro sob a travessa no tempo



(f) Deslocamentos no balastro sob a travessa em frequência



(g) Deslocamentos no balastro entre as travessas no tempo



(h) Deslocamentos no balastro entre as travessas em frequência

Figura 6.18: Análise dos deslocamentos em diferentes nós do modelo de elementos finitos

Capítulo 7

Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

O transporte ferroviário na conjuntura atual tem um papel relevante na redução de gases com efeito de estufa como é possível comprovar no caso do CO₂.

Os principais componentes da via férrea balastrada, no estado de arte atual, encontram-se bastante otimizados, tendo a sua evolução sido focada no aumento da resistência, e consequente aumento de peso sendo este um fator bastante importante nas vias de alta velocidade. Contudo, existem alguns aspetos que necessitam ser investigados, como por exemplo, a corrugação ferroviária que contribui para uma degradação precoce da qualidade da via. Alguns estudos apontam para que a utilização de USP possa contribuir para reduzir os impactos causados por este problema.

O efeito dinâmico das cargas é amplificado pelas irregularidades geométricas do nivelamento da via, pelos defeitos na mesa de rolamento do carril e pelos defeitos nas rodas do material circulante. Este efeito acelera em geral a degradação dos componentes da via férrea, podendo, contudo, ser mitigado através da introdução de elementos resilientes. Estes porém, provocam um aumento dos deslocamentos verticais.

O aumento dos deslocamentos verticais provocados pelo excesso de flexibilidade da via intensifica o consumo energético do material circulante e pode promover a degradação de alguns componentes da via, como por exemplo os carris.

O retorno geral da utilização de USP é positivo, quer na redução de vibrações e ruído, quer na manutenção da geometria da via a longo prazo; contudo, é de extrema importância dimensionar corretamente estes elementos para manter os deslocamentos ferroviários em valores aceitáveis.

A análise no Capítulo 4 das velocidades medidas com geofones na via férrea Mashhad-Tehran, permitiram comprovar que a utilização de USP promove o isolamento da via relativamente à transmissão de vibrações para a sua periferia, apresentando efeitos bastante positivos.

Foram desenvolvidos modelos numéricos para reproduzir o ensaio. Apesar da frequência natural dos geofones ser elevada (4,5 Hz), o que leva a que a sua gama de sensibilidade não seja a mais adequada para a calibração dos modelos numéricos aqui desenvolvidos, foi obtida uma reprodução do ensaio muito boa para a via sem USP, e a via com USP apresentou tendências equivalentes. Da análise e comparação destes modelos, foi possível aferir que a introdução de USP na via melhora o comportamento da mesma relativamente às forças de contacto travessa-balastro, e não evidencia alterações nas forças de contacto roda-carril. Foram detetadas acelerações importantes na travessa. Contudo, espera-se que estas não tenham grande influência no comportamento da via a longo prazo, uma vez que são originadas por deslocamentos muito pequenos (na ordem das centésimas de milímetro), associados à propagação de ondas no sistema da via.

A realização de um estudo paramétrico, variando a rigidez dos elementos resilientes e o módulo de elasticidade da fundação, permitiu desenvolver uma equação para estimar os deslocamentos do carril e pré-dimensionar a combinação de palmilhas de carril (RP) e de travessa (USP). Este estudo paramétrico permitiu perceber que (para o perfil de via adotado), o módulo de elasticidade da fundação tem uma reduzida influência na força que é transmitida pela travessa ao balastro. Contudo, variar a rigidez dos elementos resilientes apresenta uma elevada influência neste parâmetro.

Com base na equação desenvolvida no estudo paramétrico, foi pré-dimensionada uma solução com recurso a USP para um estudo de caso, com uma variação brusca de rigidez da fundação. Analisando a solução prescrita, conclui-se que a formulação é adequada para estimar os deslocamentos do carril cumprindo os objetivos estipulados. Neste estudo de caso, também foi possível aferir que a utilização de USP reduz as forças de interação roda-carril numa via sem defeitos de nivelamento nem irregularidades na mesa do rolamento do carril. Também foram reforçadas as conclusões anteriores, relativamente ao bom desempenho que estes elementos promovem na redução das forças de contacto travessa-balastro.

A análise numérica de uma via com desgaste ondulatório num modelo previamente calibrado em que se simulou a aplicação de USP, permitiu concluir que a máxima magnitude das forças travessa-balastro é menor e mais homogénea. Este facto evidencia um bom comportamento da via a longo prazo. Por outro lado, não foi possível tirar conclusões expressivas relativamente às forças de contacto roda-carril. Analisando o comportamento da travessa em deslocamentos, este evidencia que possivelmente existirá maior desgaste das partículas de balastro em contacto com a travessa. No entanto, analisando o comportamento (em deslocamentos) no balastro sob a travessa e no eixo da via entre travessas, este apresenta um comportamento similar no modelo sem USP.

Em suma, relativamente à introdução de USP em vias com desgaste ondulatório, o autor acredita que estas podem ter um efeito benéfico preventivo, uma vez que os modelos numéricos não evidenciam alterações apreciáveis de comportamento ao nível da fonte de excitação do sistema, e a bibliografia relata casos de sucesso em que estes elementos foram instalados para mitigar esta patologia.

7.2 Desenvolvidos futuros

O comportamento das USP é complexo, como são fabricadas essencialmente com elastómeros, a sua rigidez vertical depende da variação de volume e da distorção, além de o seu comportamento não ser constante com a temperatura e com a frequência de aplicação da carga. Na modelação destes componentes em vias férreas é normalmente necessário adotar modelos de comportamento simplificados, o que pode comprometer os resultados.

Como futuras linhas de investigação, sugere-se, a realização de ensaios laboratoriais para caracterizar o comportamento mecânico destes elementos, e a adoção de modelos matemáticos mais complexos que permitam representar o seu comportamento com menos simplificações. Um dos objetivos seria estudar com precisão a distribuição de cargas que estes elementos promovem sobre o balastro, uma vez que, parece ser o parâmetro em que estes têm maior influência (força de contacto travessa-balastro). Uma ideia seria, modelar a USP como um elemento contínuo sobre elementos discretos que representem a camada de balastro.

Outra linha de investigação seria desenvolver modelos físicos destes elementos (em poliuretano com uma carga de granulado de borracha reciclada) e testar em laboratório se esta combinação de materiais é compatível com as exigências da ferrovia. Isto poderia permitir fabricar estes elementos com: uma rigidez elevada, e um custo compatível com a sua aplicação em toda a extensão da via; permitindo assim recuperar parte da resiliência que as travessas de madeira conferiam à via férrea e compatibiliza-la com as vantagens do elevado peso das travessas de betão armado.

Sugere-se como última linha de investigação, o estudo numérico da influência da rigidez horizontal da USP na rigidez horizontal da via. Uma vez que, esta é uma das questões em que se encontram opiniões divergentes na bibliografia. Neste trabalho, apesar do parâmetro de rigidez horizontal da USP estar apresentado nos parâmetros dos modelos numéricos, este apenas têm em conta a rigidez horizontal da USP, desprezando o efeito do confinamento conferido pelo balastro em torno das travessas. Contudo, como não foram simuladas cargas horizontais esta simplificação é válida. Se por um lado, a bibliografia afirma que com a via carregada a rigidez horizontal desta depende quase exclusivamente do atrito entre a base da travessa e o balastro, com a introdução de USP no sistema isto pode não ser verdade e aumentar a dependência deste parâmetro com o confinamento lateral da travessa.

Bibliografia

- Alves, João Nogueira. Avaliação de dimensionamento da subestrutura ferroviária de linhas da alta velocidade. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2010.
- Andrade, Bruna Helena de Sousa e. Utilização de materiais anti-vibráteis e de isolamento acústico na via férrea. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- Auersch-Saworski, Lutz. The dynamic behavior of railway tracks with under sleeper pads, finite-element boundary-element model calculations, laboratory tests and field measurements. In *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, 2014.
- Barreto, Jeniffer Costa. Modelação da interação lateral balastro-travessa em vias-férreas. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2016.
- Correia, Bruno Miguel Machado. Resposta dinâmica do sistema veículo-via férrea em zonas de variação das condições de suporte da via. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.
- Esveld, Coenraad. *Modern railway track*. MRT-productions Zaltbommel, 2001.
- Fernandes, Manuel de Matos. *Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais*, volume 1. FEUP edições, 2006.
- Fernandes, Manuel de Matos. *Mecânica dos Solos—Introdução à engenharia geotécnica*, volume 2. FEUP edições, 2011.
- Fontul, Simona. *Apontamentos de Infraestruturas ferroviárias e portuárias*. FCT UNL, 2015.
- Fortunato, Eduardo Manuel Cabrita. *Renovação de plataformas Ferroviárias*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- Garçia, Ricardo. Portugal já cumpriu o protocolo de quioto. *Publico*, 10 de Maio, 2014.
- Gräbe, P J, Mtshotana, B F, Sebati, M M e Thünemann, E Q. The effects of under-sleeper pads on sleeper-ballast interaction. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2016.

- Guerreiro, Luis. *Apontamentos sobre a borracha na concepção anti-sísmica*. FEUP, 2003.
- Hatch, Michael R. *Vibration simulation using MATLAB and ANSYS*. CRC Press, 2001.
- Hughes, Thomas JR. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation, 2012.
- Indraratna, Buddhima e Salim, Wadud. *Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective*. CRC Press, 2005.
- Iwnicki, Simon. *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press, 2006.
- Jabbar, Ali Zakeri, Morteza, Esmaeili e Hamidreza, Heydary-Noghabi. A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations. *Rail and Rapid Transit*, 2015.
- Johansson, Anders, Nielsen, Jens CO, Bolmsvik, Rikard, Karlstrom, Anders e Lundén, Roger. Under sleeper pads-influence on dynamic train-track interaction. *Wear*, 2008.
- Lakušić, Stjepan, Ahac, Maja e Haladin, Ivo. Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. In *10th Slovenian Road and Transportation Congress*, 2010.
- LÓPEZ PITA, Andrés. Ferrocarril, ingeniería y sociedad. *Discurso leído en el acto de su Recepción Pública en la Real Academia de Ingeniería el día*, 2004.
- Loy, Harald e Augustin, Andreas. Pushing the limits of ballasted heavy-haul railway track by means of high-strength under-sleeper pads made of a specially developed pur. *Rail Engineering International*, 2015.
- Maranha das Neves, E. *Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. Publicações LNEC, 2013.
- Marlon, Kavungo, Gomes, Manuel Leal e Pinto, Amândio Teixeira. *Fundamentos da Mecânica dos Solos*. Escolar Editora, 2015.
- Martins, João Paulo, Correia, A Gomes, Caldeira, Laura, Neves, E e Delgado, João LC. Comparação de resultados de ensaios de carga com placa segundo as normas AFNOR NF P94-117-1 e DIN 18134. 2008.
- Paixão, A. *Transition zones in railway tracks: An experimental and numerical study on the structural behaviour*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- Paixão, André, Alves Ribeiro, Cristina, Pinto, Nuno, Fortunato, Eduardo e Calçada, Rui. On the use of under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: experimental field testing. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2015.
- Pita, Andrés López. *Infraestructuras ferroviarias*, volume 12. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2006.

- Popp, Karl e Schiehlen, Werner. *System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade*, volume 6. Springer Science & Business Media, 2013.
- Sol-Sánchez, Miguel, Moreno-Navarro, Fernando e Rubio-Gámez, M^a Carmen. The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 2015.
- Sol-Sánchez, Miguel, Moreno-Navarro, Fernando e Rubio-Gámez, M^a Carmen. Viability of using end-of-life tire pads as under sleeper pads in railway. *Construction and Building Materials*, 2014.
- Sousa, João Figueira, Frenandes, André e Galiau, Sónia. A evolução das acessibilidades em Portugal e as suas repercussões na organização do território. In UniPiaget, editor, *Associação Portuguesa para o Desenvolvimento Regional 15º Congresso, Cidade da Praia, Ilha Santiago, em Cabo Verde, de 6 a 11 de Julho*, 2009.
- Triantafyllidis, Th. *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena: Proceedings of the International Conference, Bochum, Germany, 31 March-2 April 2004*. CRC Press, 2004.
- Vale, Cecília Maria Nogueira Alvarenga Santos. *Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- Varandas, J.N., Silva, R., Silva, M. A. G., Lopes, N. e Hö Ischer, P. The impact of rail corrugation on the degradation of ballast. In Pombo, J., editor, *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2012.
- Varandas, J.N., Silva, M.A.G., Silva, R. e Lopes, N. Ground vibrations induced by railway traffic in areas with corrugated rail. In Forde, M., editor, *Proceedings of the Railway Engineering 2013 - Twelfth International Conference and Exhibition*, 2013b.
- Varandas, José Nuno. *Long-term behaviour of railway transitions under dynamic loading application to soft soil sites*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013a.

Apêndice A

Estudo Paramétrico - apresentação de resultados

A.1 Introdução

O presente anexo pretende disponibilizar os resultados das modelações numéricas apresentadas e discutidas no Capítulo 5. Este estudo pretendeu aferir a influência da rigidez vertical das palmilhas de carril (RP) e das palmilhas de travessa (USP) no deslocamento vertical do carril.

O estudo em causa teve como o objetivo disponibilizar dados que permitam determinar a combinação de palmilhas de carril RP e palmilhas de travessa USP, partindo do módulo de elasticidade da fundação. Ou em sentido oposto, com os dados do deslocamento do carril provenientes da instrumentação de uma via, promover uma calibração mais expedita do módulo de elasticidade da fundação em modelos numéricos comparáveis aos casos aqui estudados.

A metodologia seguida consistiu em desenvolver e analisar 612 modelos numéricos com a geometria disposta na Figura A.1, e a estrutura tipo da via apresentada na Figura A.2.

No Capítulo 5, é possível pesquisar mais dados relativos aos modelos em causa. Contudo, neste anexo são novamente apresentadas as variáveis do estudo paramétrico, na Tabela A.1, encontram-se dispostos os parâmetros de rigidez vertical das palmilhas de carril (RP) e palmilhas de travessa (USP) adotadas, ao passo que na Tabela A.2, são apresentados os módulos de elasticidade da fundação considerados. A Tabela A.3, apresenta todas as combinações consideradas entre palmilhas de carril (RP) e palmilhas de travessa (USP). O parâmetro K_{eq} foi calculado com a Equação (A.1). O total de modelos analisado corresponde ao produto das 36 combinações de elementos resilientes aqui apresentadas pelo número de módulos de elasticidade da fundação expostos na

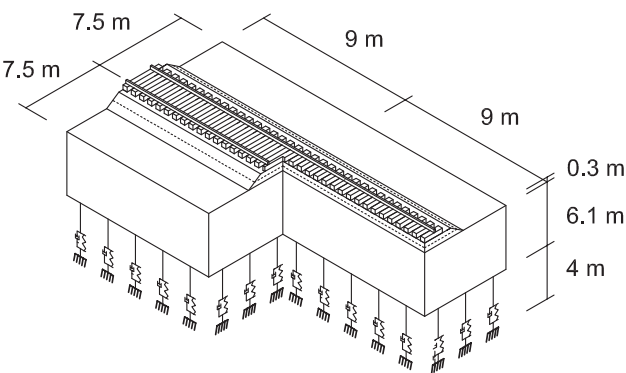


Figura A.1: Geometria tipo do modelo

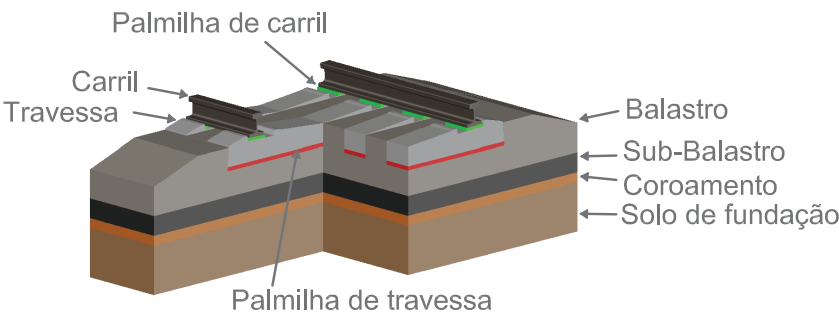


Figura A.2: Esquema tipo da via balastrada

Tabela A.1: Rigidez vertical das palmilhas de carril (RP) $K_{p,v}$ e de travessa (USP) $K_{usp,v}$

Nº.	RP [kN/mm]	USP [N/mm ³]
1	40,0	0,13
2	100	0,17
3	200	0,21
4	300	0,25
5	400	0,30
6	500	3,30 (REF,sem USP)

Tabela A.2: Módulos de elasticidade da fundação E_{fd}

Módulo de elasticidade E_{fd} [MPa]		
12,5	60	200
25	80	250
40	100	300
—	120	350
—	140	400
—	160	450
—	180	500

Tabela A.2, perfazendo assim um total de 612 modelos.

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{2.K_p} + \frac{1}{K_{USP}} \quad (A.1)$$

Tabela A.3: Modelos analisados

Modelo	Nomenclatura	RP $K_{p,v}$ [kN/mm]	USP $K_{usp,v}$ [N/mm ³]	K_{eq} [kN/mm]
1	USP1-RP1	40	0,13	45
2	USP1-RP2	100	0,13	67
3	USP1-RP3	200	0,13	81
4	USP1-RP4	300	0,13	87
5	USP1-RP4	400	0,13	90
6	USP1-RP5	500	0,13	92
7	USP2-RP1	40	0,17	50
8	USP2-RP2	100	0,17	80
9	USP2-RP3	200	0,17	100
10	USP2-RP4	300	0,17	109
11	USP2-RP5	400	0,17	114
12	USP2-RP6	500	0,17	117
13	USP3-RP1	40	0,21	54
14	USP3-RP2	100	0,21	90
15	USP3-RP3	200	0,21	116
16	USP3-RP4	300	0,21	129
17	USP3-RP5	400	0,21	136
18	USP3-RP6	500	0,21	141
19	USP4-RP1	40	0,25	57
20	USP4-RP2	100	0,25	99
21	USP4-RP3	200	0,25	131
22	USP4-RP4	300	0,25	147
23	USP4-RP5	400	0,25	157
24	USP4-RP6	500	0,25	163
25	USP5-RP1	40	0,30	60
26	USP5-RP2	100	0,30	108
27	USP5-RP3	200	0,30	148
28	USP5-RP4	300	0,30	168
29	USP5-RP5	400	0,30	181
30	USP5-RP6	500	0,30	190
31	REF-RP1	40	3,30	78
32	REF-RP2	100	3,30	186
33	REF-RP3	200	3,30	346
34	REF-RP4	300	3,30	487
35	REF-RP5	400	3,30	610
36	REF-RP6	500	3,30	720

A.2 Equação aproximada do deslocamento do carril

Os resultados dos modelos apresentados na Tabela A.3, encontram-se apresentados na Figura A.3. Contudo estes valores também podem ser obtidos de forma aproximada pela Equação (A.2). O valor $-F_{\text{eixo}}$ corresponde à carga de eixo do material circulante em kN, caso este valor seja considerado 250 kN serão obtidos os valores apresentados graficamente. Os parâmetros (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , B_1 , B_2 e B_3) são obtidos pela Tabela A.4. O parâmetro E_{fd} corresponde ao módulo de elasticidade da fundação em MPa. A rigidez equivalente dos elementos resilientes K_{eq} , pode ser obtido pela Equação (A.1), ou pela Tabela A.3, para os modelos analisados, este valor deve ser introduzido na Equação em kN/mm.

Contudo, importa que os resultados obtidos pela Equação (A.2) apresentam algumas diferenças relativamente aos modelos numéricos. Apesar do coeficiente de determinação, que representa uma medida de ajustamento do modelo, estar próximo da unidade $R^2=0.9957$.

$$u_z = \frac{-F_{\text{eixo}}}{-250} \cdot (A_1 \cdot E_{\text{fd}}^3 + A_2 \cdot E_{\text{fd}}^2 + A_3 \cdot E_{\text{fd}} + A_4 + A_5 \cdot \ln(E_{\text{fd}}) + B_1 \cdot K_{\text{eq}}^2 + B_2 \cdot K_{\text{eq}} + B_3 \cdot \ln(K_{\text{eq}})) \quad (\text{A.2})$$

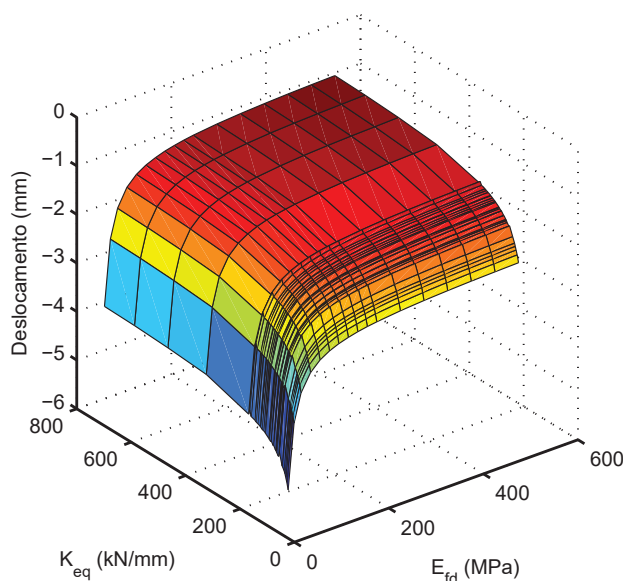


Figura A.3: Deslocamento do carril em função da rigidez equivalente dos elementos resilientes e do módulo de elasticidade da fundação

Tabela A.4: Parâmetros da Equação (A.2)

$A_1 \cdot (10^{-8})$	$A_2 \cdot (10^{-5})$	$A_3 \cdot (10^{-2})$	$A_4 (10^1)$	A_5	$B_1 \cdot (10^{-6})$	$B_2 \cdot (10^{-3})$	B_3
-4,711	5,518	-2,609	-1,41	2,095	2,509	-4,474	1,149

O valor da diferença corresponde à subtração entre os resultados apresentados na Figura A.3, e os obtidos pela Equação (A.2). Considerou-se o valor absoluto desta diferença, e este pode ser observado na Figura A.4. A diferença tem em conta a aproximação da equação e o arredondamento dos coeficientes apresentados da Tabela A.4. A diferença máxima é de 0,25 mm. Caso $E_{fd} > 40$ MPa a diferença máxima desce para 0,12 mm e corresponde aos modelos USP1-RP1 e USP5-RP6. Contudo, estas combinações de USP e RP são improváveis, pois corresponde à aplicação dos elementos resilientes mais flexíveis ou mais rígidos em simultâneo. Se estes dois modelos não forem considerados a diferença máxima não ultrapassa os 0,09 mm. Em suma, para as combinações mais prováveis a Equação A.2 mostra-se adequada para estimar o deslocamento do carril.

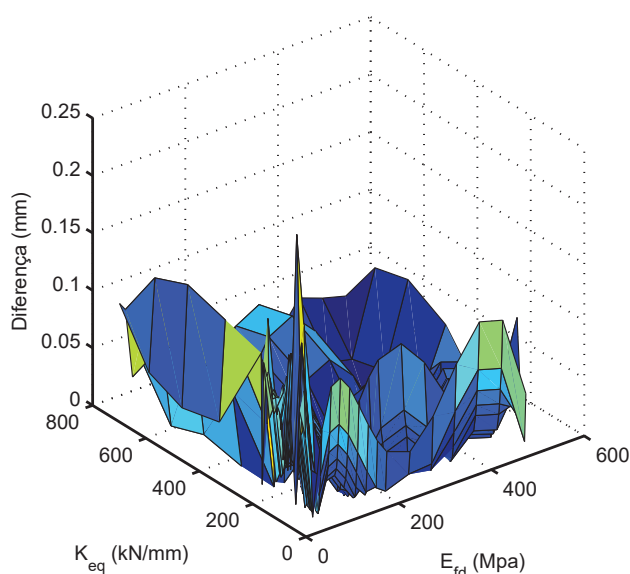


Figura A.4: Diferença no cálculo do deslocamento do carril com recuso à Equação(A.2)

A.3 Representação 2D do deslocamento do carril

Esta secção do Anexo justifica-se devido a ser relativamente expedito extrair informação de gráficos 2D.

As Figuras A.5, A.6, A.7, A.8, A.9 e A.10 apresentam-se organizados por USP. Isto é, cada gráfico corresponde a uma USP e cada curva desse gráfico corresponde a sua combinação com determinada RP. A Figura A.10, corresponde à não existência de USPs instaladas na via.

Também são apresentados os resultados organizados por RP nas Figuras A.11, A.12, A.13, A.13, A.15 e A.15. Neste caso a cada gráfico corresponde a uma RP e as curvas do mesmo correspondem às combinações com as USPs.

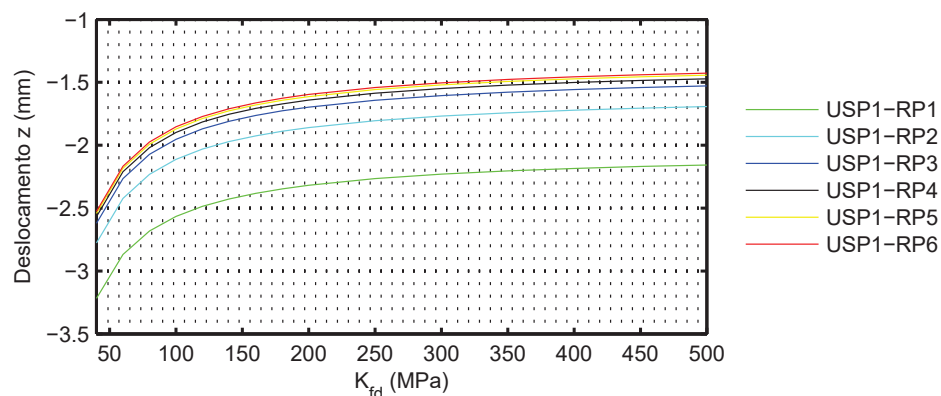


Figura A.5: Deslocamento do carril com USP-0,13 N/mm³

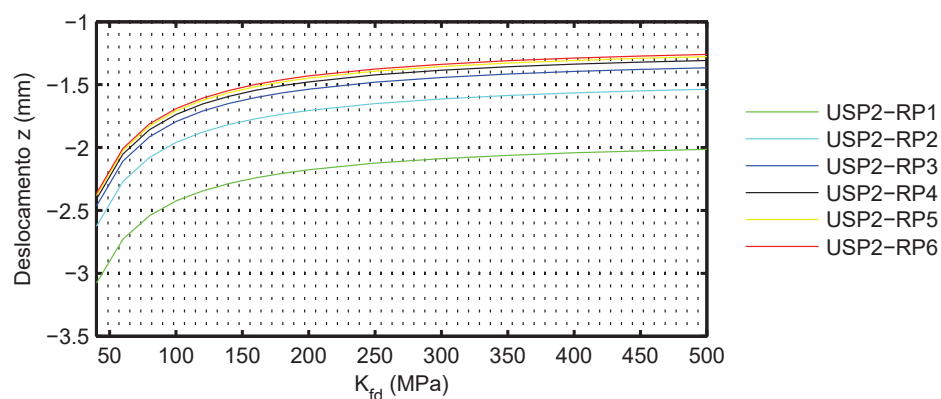


Figura A.6: Deslocamento do carril com USP-0,17 N/mm³

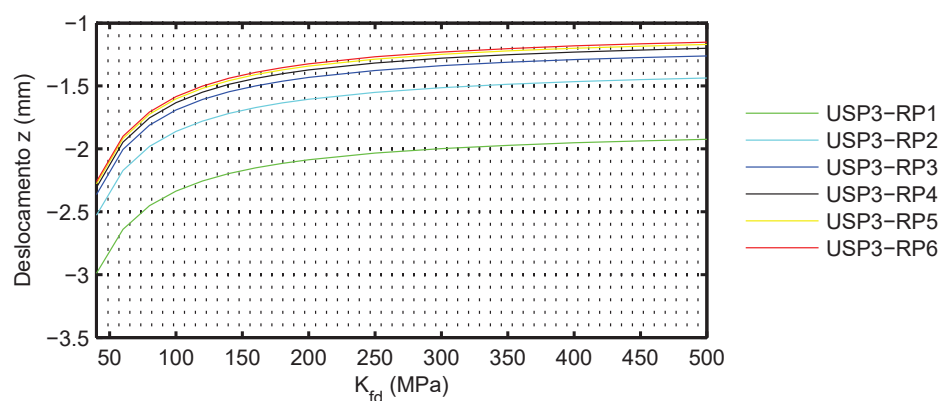
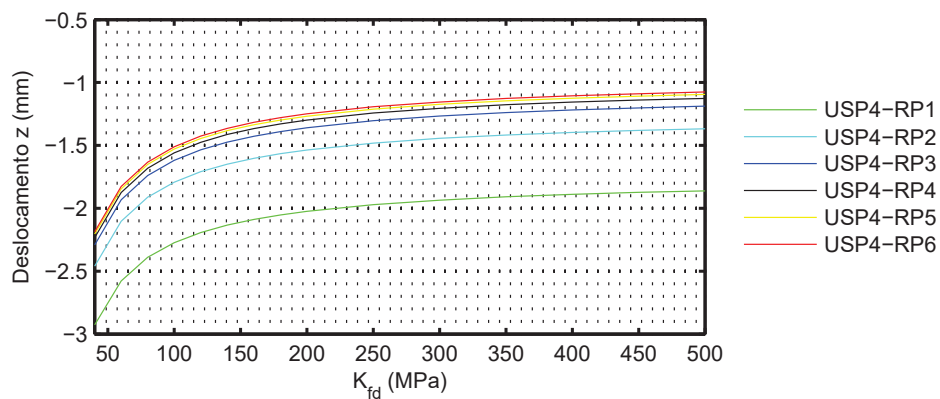
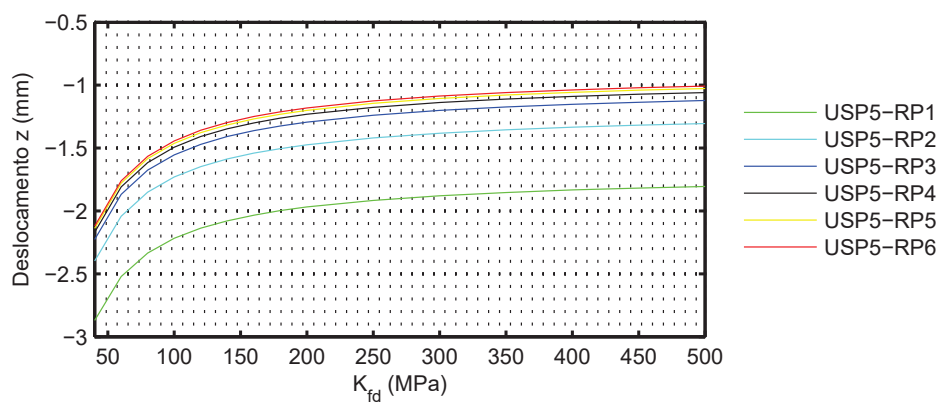
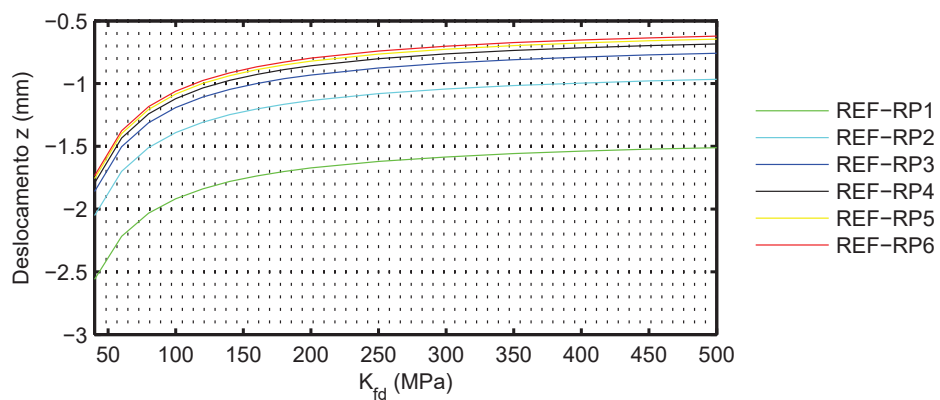


Figura A.7: Deslocamento do carril com USP-0,21 N/mm³

Figura A.8: Deslocamento do carril com USP-0,25 N/mm³Figura A.9: Deslocamento do carril com USP-0,30 N/mm³Figura A.10: Deslocamento do carril sem USP-3,30 N/mm³

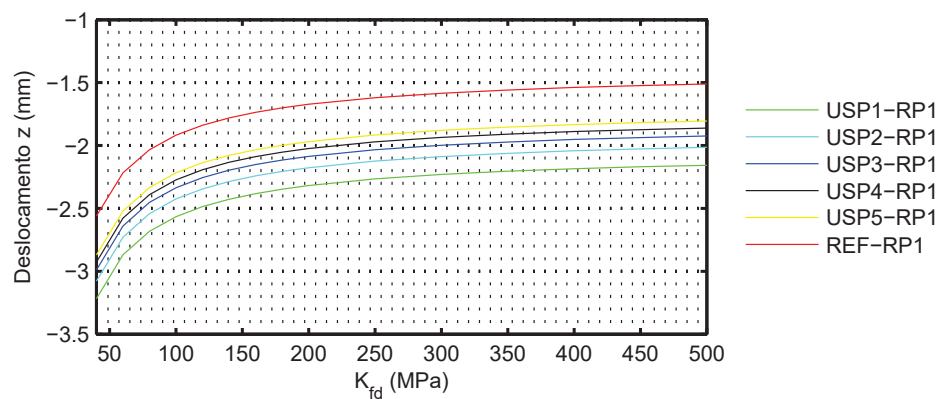


Figura A.11: Deslocamento do carril com RP-40 kN/mm

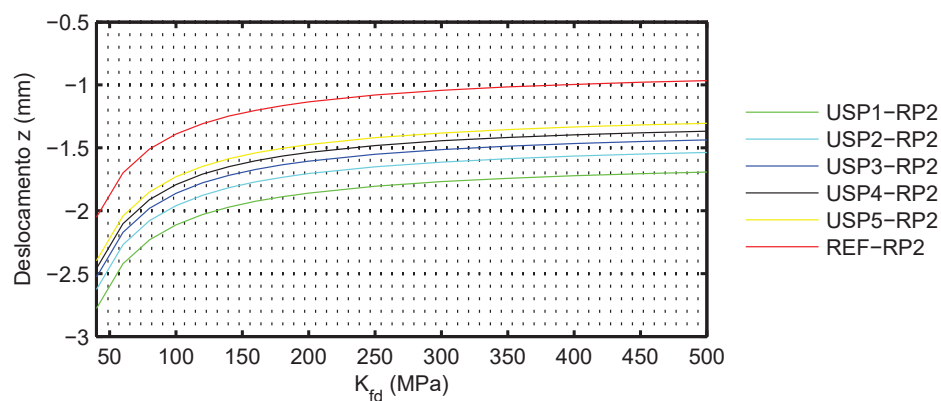


Figura A.12: Deslocamento do carril com RP-100 kN/mm

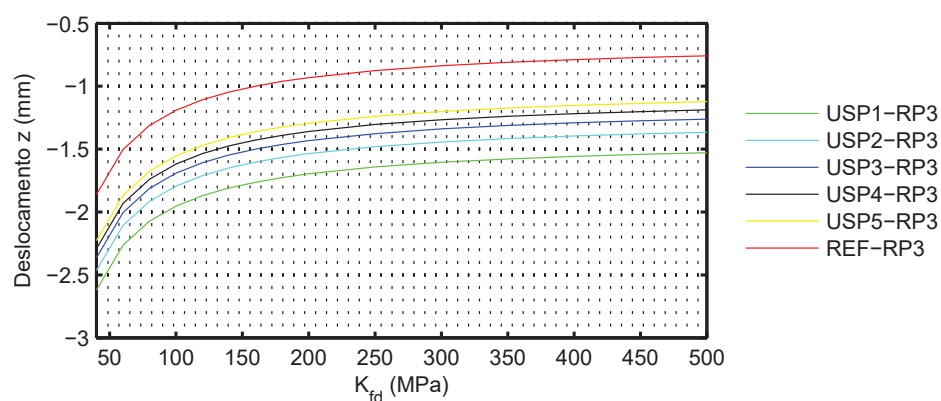


Figura A.13: Deslocamento do carril com RP-200 kN/mm

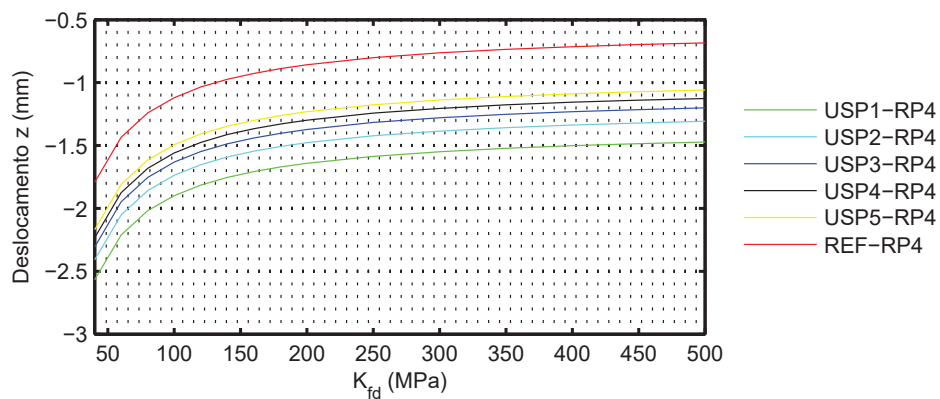


Figura A.14: Deslocamento do carril com RP-300 kN/mm

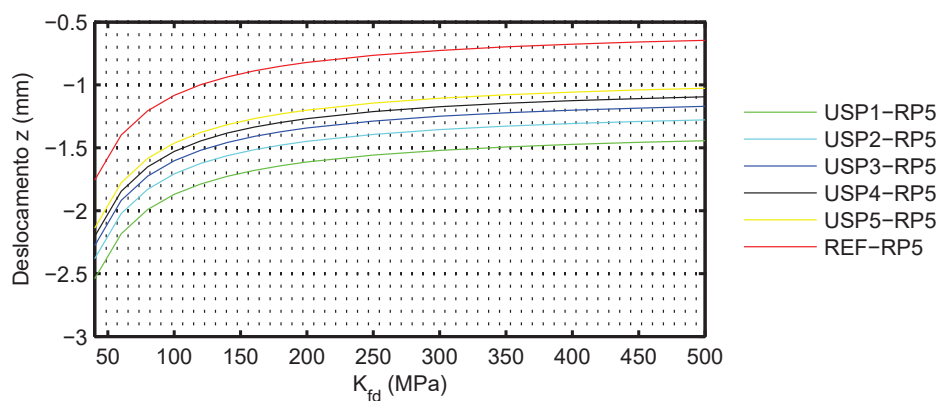


Figura A.15: Deslocamento do carril com RP-400 kN/mm

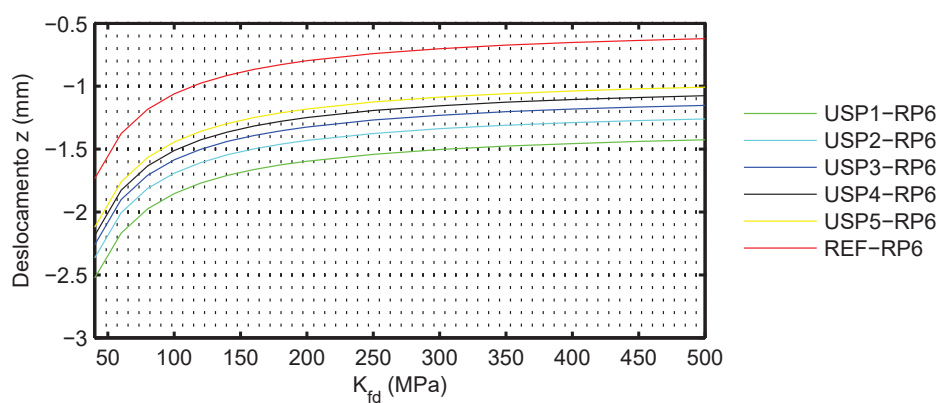


Figura A.16: Deslocamento do carril com RP-500 kN/mm